

Министерство образования и науки Украины  
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ  
«ХАРЬКОВСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ»

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД  
КОНСПЕКТ ЛЕКЦИЙ ДЛЯ СТУДЕНТОВ СПЕЦ. 7092501  
“ АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ УПРАВЛЕНИЕ  
ТЕХНОЛОГИЧНЫМИ ПРОЦЕССАМИ“

Затверждено  
редакционно-издательским  
советом университета  
протокол № от 22.06.06 г.

Харьков НТУ «ХПИ» 2007

Авторы: Шищенко Л.А., Приходько О.Ю..

Рецензент: *Рудько Александр Пантелеевич*, кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология машиностроения и металлорежальных станков»

Национального технического университета «ХПИ»

Автоматизированный электропривод. Конспект лекций.

/ Шищенко Л.А., . - Харьков: НТУ „ХПИ”, 2006.- 99 с. – Рос. мовою.

В конспекте лекций поставлена задача курса «Автоматизированный электропривод», выполнен анализ разновидностей систем автоматического управления электроприводом (САУ ЭП), рассмотрена совмещенная функциональная схема регулируемого и следящего электропривода (РЭП и СЭП)..

Подробно освещены аналоговые САУ ЭП, станочный и цифровой электроприводы. Приведены рекомендации по конструированию принципиаль-

ных схем управления электроприводами.

Предназначен для самостоятельной работы по изучению курса студентами специальности 7092501 «Автоматизированное управление технологическими процессами» дневного и заочного обучения.

*Илл. 112    Табл. 5    Библиогр.9*

Л.А. Шищенко  
О.Ю. Приходько

НТУ «ХПИ», 2006

## СОДЕРЖАНИЕ

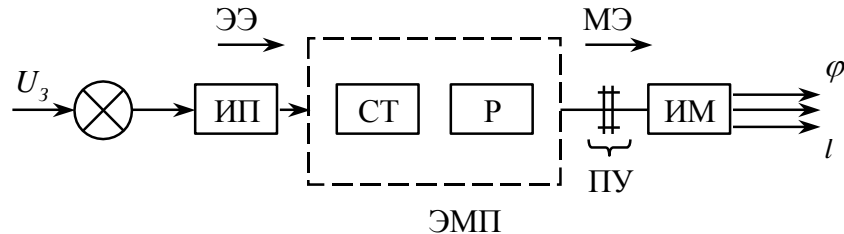
1	Введение в курс «Автоматизированный электропривод» .....	6
1.1	Предмет курса .....	6
1.2	Задачи курса .....	7
1.3	Анализ разновидностей САУ ЭП.....	7
1.4	Функциональная схема РЭП и СЭП .....	7
2	АНАЛОГОВЫЕ САУ ЭП .....	9
2.1	Статические режимы аналоговых САУ ЭП .....	9
2.1.1	Математический аппарат для оценки статических режимов САУ ЭП .....	10
2.1.2	Статические характеристики для двигателя постоянного тока в зависимости от способа питания.....	10
2.1.3	Статика узла с отрицательной обратной связью по напряжению .....	13
2.1.4	Статика узла с обратной связью по скорости.....	15
2.1.5	Статика узла с обратными связями по току.....	16
2.1.6	Статика узлов с задержанными обратными связями .....	18
2.1.7	Статика системы с подчиненным регулированием и последовательной коррекцией .....	19
2.1.8	Статический режим двухконтурной системы с подчиненным управлением (для регулируемого электропривода с обратными связями с отсечками по скорости и по току) .....	22
2.1.9	Методика построения упорной характеристики .....	24
2.2	Динамика аналоговых САУ ЭП .....	27
2.2.1	Оценки динамического режима .....	28
2.2.2	Математический аппарат для описания динамики .....	28
2.3	Передаточные функции звеньев, входящих в систему ЭП.....	30
2.4	Методика построения переходных процессов на основе использования структурной схемы САУ ЭП.....	36
2.5	Синтез САУ ЭП .....	41
2.5.1	Методика оптимизации.....	42
2.5.2	Оптимизация внешнего контура — контура скорости (синтез регулятора скорости) .....	47
2.5.3	Особенности и разновидности источников питания САУ ЭП .....	48
2.5.4	Особенности трехфазных тиристорных преобразователей.....	51
2.5.5	Инверторный режим .....	57
2.5.6	Современные комплектные тиристорные преобразователи .....	59
2.5.7	Тиристорный преобразователь частоты.....	60
2.5.8	Разновидности преобразователей частоты .....	62
2.5.9	Особенности стандартных ТПЧ на базе АИТ.....	63
2.5.10	Особенности широтно-импульсного преобразователя (ШИП).....	64
2.5.11	Особенности реверсивного ШИП.....	67

3	СТАНОЧНЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД .....	68
3.1	Определение, конструктивные и технологические особенности РЭП .....	68
3.1.1	Структура РЭП .....	68
3.1.2	Конструктивные и технологические особенности САУ РЭП. Конструктивные особенности: ДОС, ЗИ, ИП, ОУ .....	69
3.1.3	Требования, предъявляемые к РЭП .....	70
3.2	Определение, конструктивные и технологические особенности СЭП .....	71
3.2.1	Конструктивные особенности СЭП.....	71
3.2.2	Требования, предъявляемые к СЭП .....	74
3.2.3	Разновидности СЭП .....	74
3.2.4	Классификация следящих приводов по виду задания, по порядку астатизма, по виду переходных процессов и по величине ошибки.....	75
3.3	Особенности двухзонного регулирования .....	76
3.3.1	Примеры реализации следящего электропривода .....	78
3.3.2	Ошибки в СЭП.....	79
3.4	Динамика СЭП.....	82
4	ЦИФРОВОЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД .....	83
4.1	Необходимость в цифровом приводе .....	83
4.2	Общая структура ЦЭП .....	83
4.2.1	Современные разновидности программируемых контроллеров.....	84
4.2.2	Области применения программируемых контроллеров.....	84
4.3	Структура ЦЭП.....	84
4.3.1	Понятие квантования и восстановления .....	85
4.3.2	Особенности квантования .....	85
4.4	Синтез ЦЭП.....	88
4.4.1	Примеры реализации цифровых контуров .....	90
4.5	Измерительные преобразователи в СЭП.....	91
4.6	Разновидности датчиков .....	92
4.6.1	Особенности импульсных датчиков.....	92
4.6.2	Кодовые датчики .....	94
5	КОНСТРУИРОВАНИЕ ПРИНЦИПИАЛЬНЫХ СХЕМ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДАМИ.....	95
5.1	Особенности электродвигателей для следящих приводов роботов и манипуляторов .....	96
5.2	Шаговые двигатели (ШД) .....	96
	СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	98

# 1 Введение в курс «Автоматизированный электропривод»

## 1.1 Предмет курса

Электропривод — это система, состоящая из источника питания (ИП), электромеханического преобразователя (статор и ротор) и исполнительного механизма (ИМ) (рис. 1.1).



ПУ — передаточное устройство; ЭМП — двигатель; ЭЭ — электрическая энергия; МЭ — механическая энергия;  $U_z$  — напряжение задания

Рисунок 1.1 – Структура ЭП

Предметом курса АЭП являются системы автоматического управления (рис. 1.2) электроприводами (САУ ЭП).

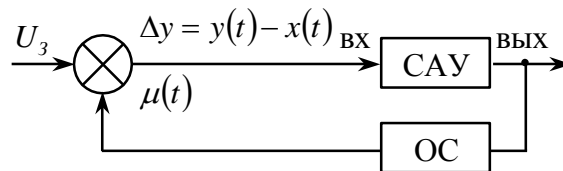
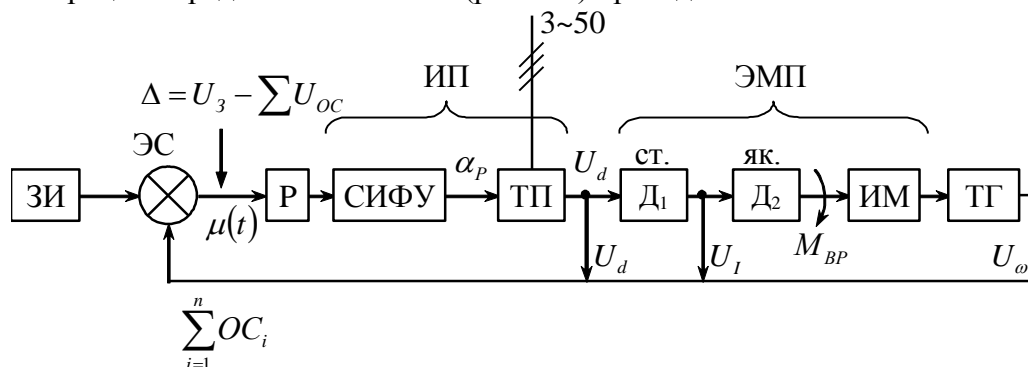


Рисунок 1.2 – Структурная схема ЭП

САУ ЭП — это совокупность электропривода и технических устройств (источник питания, средства обратных связей — ОС (датчики или измерительные преобразователи), регуляторы, корректирующие устройства, задающие устройства — задатчик интенсивности), предназначенная для выполнения технологических режимов в статике и динамике в соответствии с требованиями, обусловленными выполнением технологических процессов (по обработке металлов, перемещению изделий и заготовок).

Иллюстрация определения САУ ЭП (рис. 1.3) приведена ниже.



ЗИ — задатчик интенсивности; ЭС — элемент сравнения; Р — регулятор; СИФУ — система импульсно-фазового управления ( $\alpha_p$ ); ТП — тиристорный преобразователь;  $U_d$  — напряжение постоянного тока на выходе ТП;  $D_1$  — статор;  $D_2$  — якорь, обеспечивающий вращение; ТГ — тахогенератор; ИМ — исполнительный механизм

Рисунок 1.3 – Структура системы автоматизированного управления ЭП

## 1.2 Задачи курса

- 1 Освоение способов проектирования САУ ЭП и ее оценка в статике и динамике.
- 2 Технологическая оценка САУ ЭП в целом (конструктивные и технологические особенности).
- 3 Техничко-экономическая оценка.

## 1.3 Анализ разновидностей САУ ЭП

Классификация осуществляется по следующим критериям:

- 1 По задачам станочного оборудования:
  - САУ ЭП основных рабочих движений:
    - 1) регулируемый электропривод для приведения в движение шпинделей — для главного движения ( $\omega$  – главный,  $i$  - подчинённый);
    - 2) следящий электропривод — для привода подач ( $L(\varphi)$  – главный,  $\omega$ ,  $i$  - подчинённые);
  - Система электроприводов для выполнения вспомогательных движений.
- 2 По характеру сигналов:
  - аналоговые системы (непрерывные) — ГД, ТПД, ТПЧ (тиристорный преобразователь частоты);
  - дискретные системы: релейно-контакторные, импульсные и цифровые.
- 3 По видам обратных связей:
  - разомкнутая система без обратных связей (временные программы — светофор);
  - замкнутая система (работают по отклонению).  
(Виды ОС — по скорости, по напряжению, по току, по усилию, по положению.)
- 4 По способу коррекции:
  - с параллельными обратными связями;
  - с последовательными ОС или последовательным корректирующим устройством.
- 5 По порядку астатизма:
  - $\nu = 0$  — статические САУ ЭП;
  - $\nu = 1$  — астатические первого порядка или системы с однократным интегрированием;
  - $\nu = 2$  — системы с двукратным интегрированием или астатические системы со вторым порядком астатизма.
- 6 По функциям:
  - системы с автоматизированным разгоном, поддержанием скорости с небольшой точностью, торможением и реверсом (релейно-контакторные системы);
  - системы с автоматическим заданием и поддержанием скорости с высокой точностью (аналоговые системы);
  - следящие системы;
  - программные системы;
  - оптимальные и адаптивные системы.

## 1.4 Функциональная схема РЭП и СЭП

Рассмотрим функциональную схему РЭП и СЭП (рис. 1.4).

Схема содержит следующие элементы:

Д – Двигатель ( $D_1$  — статор,  $D_2$  — ротор);

ТП – Источник питания;

регуляторы:

- РТ — регулятор тока;
- РС — регулятор скорости;
- РП — регулятор положения;

датчики:

- ДТ — датчик тока;
- ДС — датчик скорости;
- ДП<sub>и</sub> — датчик положения импульсный;
- ДП<sub>а</sub> — датчик положения аналоговый;

задающие устройства:

- ЗУ — задающее устройство для РЭП. Вместо него может быть микропроцессор МП;
- ЗУ — задающее устройство для СЭП (например, интерполятор СЧПУ);
- ЭС1 — элемент сравнения в контуре тока;
- ЭС2 — элемент сравнения в контуре скорости;
- ЭС3 — элемент сравнения в контуре положения.

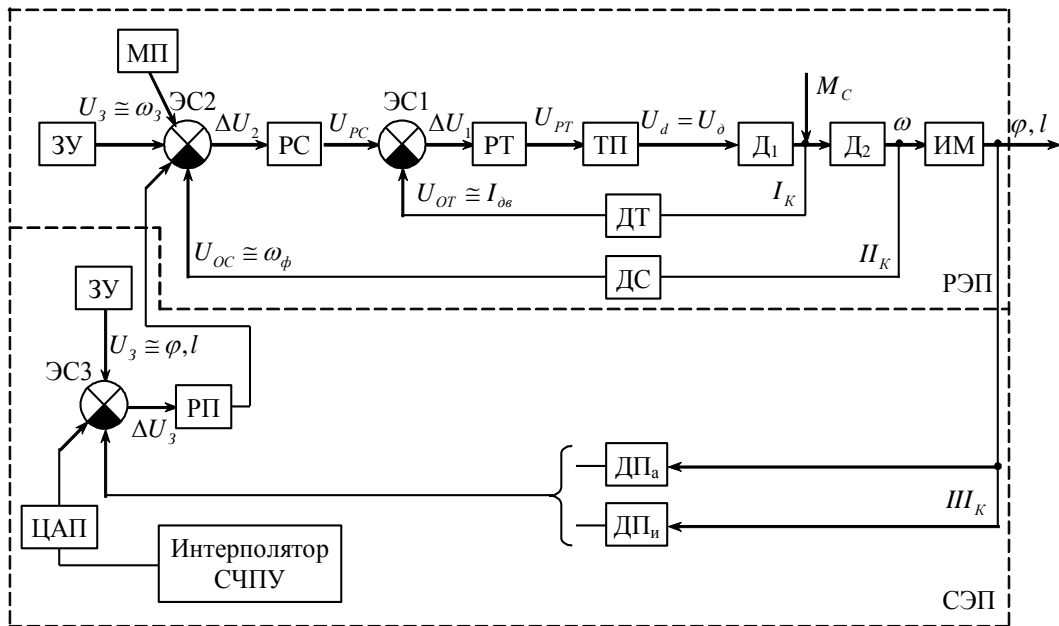


Рисунок 1.4 – Совмещённая функциональная схема РЭП и СЭП

Емкость в ОУ — интегральный регулятор.

Емкости и резисторы в ОУ — пропорционально-интегральный регулятор.

Анализ структуры современного электропривода позволяет выделить его особенности:

- 1 Аналоговый электропривод.
- 2 Система замкнутая. Имеет три вида обратных связей (по скорости  $\omega \rightarrow U_{OC}$ ; обратная связь по току двигателя  $I_{дв} \rightarrow U_{OT}$ ; обратная связь по положению  $(l, \varphi) \rightarrow U_{OP}$  — используем круговой потенциометр).
- 3 Система трехконтурная, и каждый контур имеет свои особенности: первый контур (внутренний) — контур тока (регулятор, объект регулирования и ОС); контур регулирования скорости —  $II_K$ ; третий контур — контур регулирования положения (есть регулятор положения, объект и датчик положения).

РС, РТ, РП — включены последовательно. Это теория подчиненного регулирования с последовательной коррекцией. Для регулируемого привода основным параметром является скорость, а для следящего — положение.

Система реализует теорию подчиненного регулирования с последовательной коррекцией. Все регуляторы во всех трех контурах являются корректирующими звеньями последовательного действия — все регуляторы во всех контурах включены последовательно.

## 2 АНАЛОГОВЫЕ САУ ЭП

Все САУ ЭП работают в двух режимах:

- в статическом режиме, когда выходные параметры являются стабильными во времени (это установившийся режим):

$$\omega = f(M).$$

- в динамическом режиме, когда скорость является функцией нагрузки, но с учетом времени (время в неявном виде (как дифференциал)):

$$\omega = f(M_{II}, t).$$

Указанные режимы иллюстрируются переходными процессами (рис. 2.1).

Пусковой ток не должен превышать  $2I_H$ ;  $i_{xx} = (10-15)\%$  от  $I_H$ .

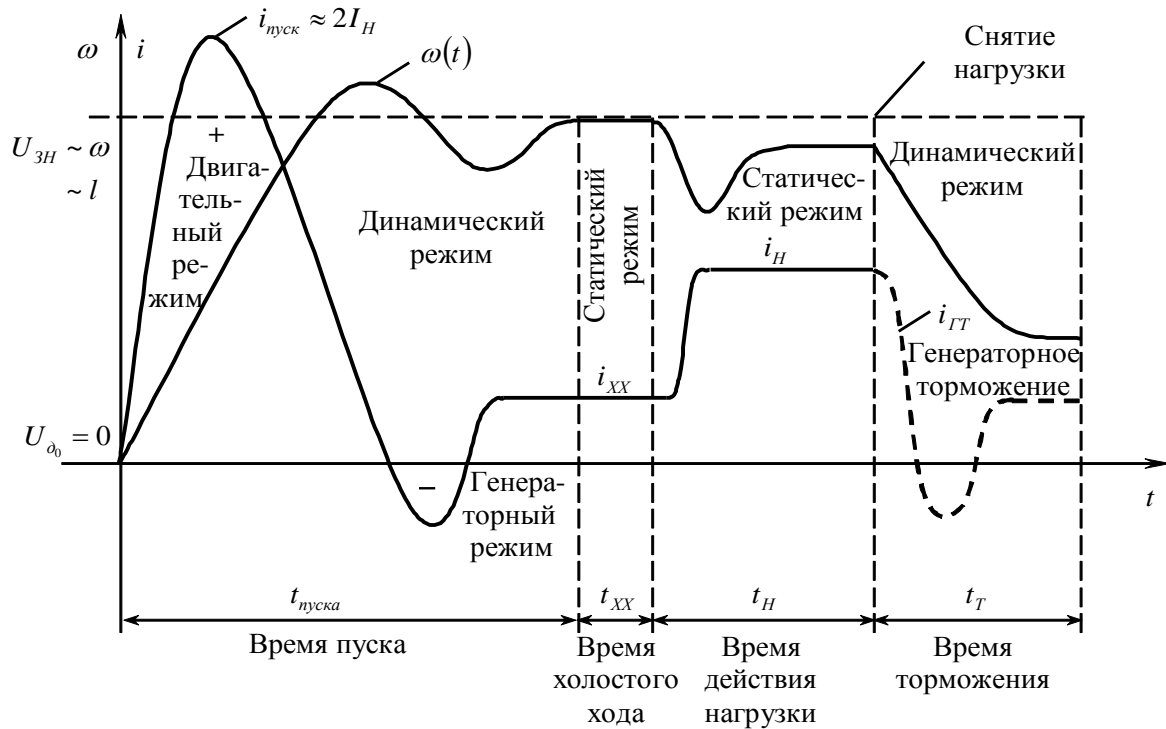


Рисунок 2.1 – Переходные процессы в САУ ЭП

### 2.1 Статические режимы аналоговых САУ ЭП

Статический режим оценивают следующими параметрами:

- 1 Диапазон регулирования

$$D = \frac{\omega_{\max}}{\omega_{\min}}.$$

Для СЭП  $D$  — несколько тысяч.

- 2 Жесткость

$$\beta = \frac{\Delta M}{\Delta \omega} = \frac{(k\Phi)^2}{R} \text{ в относительных единицах.}$$

- 3 Статическая погрешность

$$\delta = \frac{\omega - \omega_0}{\omega_0} 100\%.$$

- 4 Плавность регулирования

$$\Delta \varphi = \omega_1 - \omega_2.$$



### 2.1.1 Математический аппарат для оценки статических режимов САУ ЭП

Статика оценивается графически с помощью статической механической характеристики  $\omega = f(M)$  и статической электромеханической характеристики, когда  $\omega = f(I_H)$ , и называется она скоростной характеристикой.

Уравнение, которое описывает статическую характеристику, называется уравнением статической характеристики.

$$\omega = \omega_0 - \Delta\omega.$$

Для составления уравнения статической характеристики используется уравнение электрического баланса

$$U_C = \Delta U_{\text{я}} + E_{\text{пр.ЭДС}} + e_s,$$

где  $\Delta U_{\text{я}}$  — потери напряжения на якоре,  $\Delta U_{\text{я}} = I_{\text{я}} R_{\text{я}}$ ;

$E_{\text{пр.ЭДС}} = k_e \Phi \omega = k \Phi \omega$  — величина противо ЭДС;

$e_s$  — ЭДС самоиндукции,  $e_s = L \frac{dI}{dt}$ .

В статическом режиме  $e_s$  не учитываем, так как  $\frac{dI}{dt} = 0$ .

$U_C = I_{\text{я}} R_{\text{я}} + k \Phi \omega$  — уравнение электрического баланса, описывающее электромеханическую характеристику.

$$\omega = \omega_0 - \Delta\omega = \frac{U_C}{k\Phi} - I \frac{R_{\text{я}}}{k\Phi};$$

$$\omega = \frac{U_C}{k\Phi} - M \frac{R}{(k\Phi)^2};$$

$$M = K_m \Phi I.$$

### 2.1.2 Статические характеристики для двигателя постоянного тока в зависимости от способа питания

ДПТ — сеть (ДПТ питается от сети) (рис.2.2)

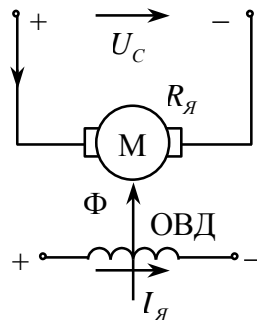


Рисунок 2.2 – Питание ДПТ от сети

$$\omega = \omega_0 - \Delta\omega = \frac{U_H}{k\Phi} - I \frac{R_{\text{дс}}}{k\Phi}.$$

При  $U_C = U_H$ ;  $R_{\text{дс}} = R_{\text{ном}}$ ;  $k\Phi = k\Phi_{\text{ном}}$ .

Если напряжение сети стабильно, получим естественную характеристику (рис. 2.3).

Искусственные характеристики могут быть получены за счет ввода сопротивления в якорную цепь (I зона), за счет уменьшения магнитного потока (II зона), за счет уменьшения напряжения сети (I зона) – 2-зонное регулирование.

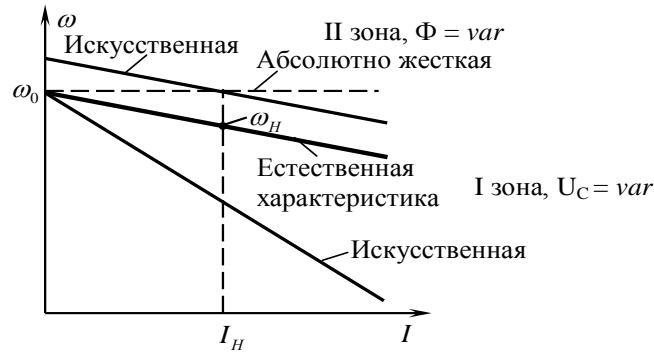


Рисунок 2.3 – Пример электромеханических характеристик ДПТ

Питание ДПТ от преобразователя без обратных связей (от преобразователя в разомкнутой системе) (рис. 2.4)

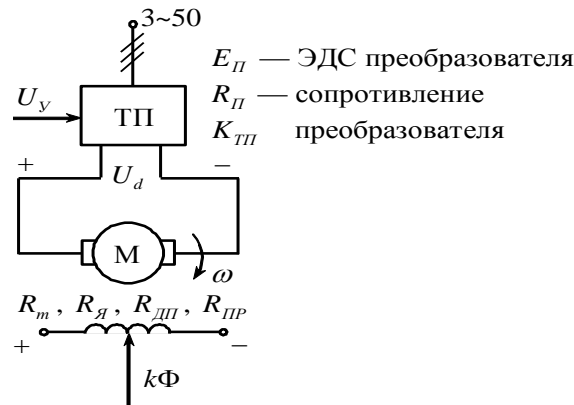


Рисунок 2.4 – Питание ДПТ от ТП

$$U_d = U_{\Pi} = U_c / k_{\Pi}$$

где  $U_d$  — выходное напряжение на преобразователе;  $k_{\Pi}$  — коэффициент преобразования; равен отношению выходного напряжения  $U_d$  к  $U_c$ .

$$k_{\Pi} = \frac{U_d}{U_c},$$

где  $U_c$  — напряжение сети.

Рассмотрим зависимость угловой скорости от величины нагрузки  $\omega = f(M)$  (рис. 2.5).

Методика анализа: уравнение механической характеристики и его исследование.

При питании от сети:

$$\omega = \omega_0 - \Delta\omega = \frac{U_H}{k\Phi_H} - I \frac{R_{яH}}{k\Phi_H} \text{ — естественная характеристика.}$$

$$\omega = \frac{U_d}{k\Phi} - M \frac{R_{яц}}{k\Phi},$$

$$R_{яц} = R_{я} + R_{дп} + R_{пп} + R_{щ} + R_{\Pi},$$

где  $R_{пп}$  — сопротивление проводов;  $R_{\Pi}$  — сопротивление преобразователя;  $R_{щ}$  — сопротивление щеток;  $R_{дп}$  — сопротивление дополнительных полюсов.

$$\omega = \frac{k_{\Pi} U_y - \Delta U_B}{k\Phi} - I \frac{R_{я} + R_{дп} + R_{пп} + R_{щ} + R_{\Pi}}{k\Phi},$$

где  $\Delta U_B$  — падение напряжения на тиристорах;  $U_y$  — напряжение управления;  $k_{\Pi}$  — коэффициент преобразования.

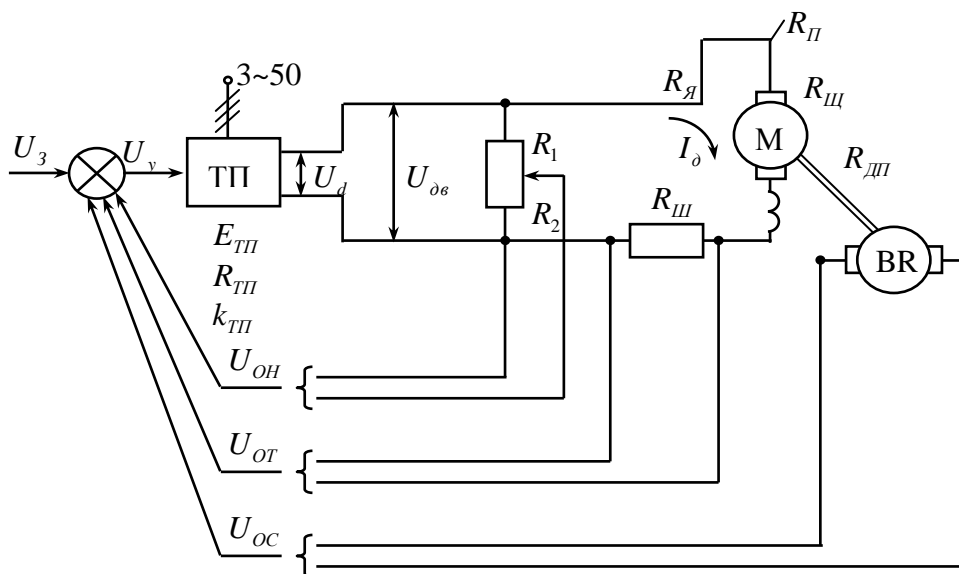


Рисунок 2.5 – Характеристики  $\omega = f(I)$  для САУ ЭП

Вывод: анализ уравнения статической характеристики показывает, что:

- характеристика линейная;
- жесткость характеристики в разомкнутой системе меньше, так как  $\uparrow \Delta\omega = \frac{I \left( \sum_{i=1}^n R_i \right)}{k\Phi \uparrow}$ , так как в якорную цепь введены дополнительные сопротивления;
- наличие преобразователя позволяет осуществлять плавное регулирование скорости в широком диапазоне.

Для устранения основного недостатка при использовании тиристорного преобразователя (большее  $\Delta\omega$ ) целесообразно проектировать замкнутые системы с привлечением обратных связей.



$ОН$  — обратная связь по напряжению;  $ОТ$  — обратная связь по току;  
 $С$  — обратная связь по скорости;  $ТГ$  —  $BR$  — тахогенератор

Рисунок 2.6 – Функциональная схема системы управления с параллельной коррекцией Система питания от тиристорного преобразователя с обратными связями (замкнутая система)

Рассмотрим схему трехконтурной системы управления с параллельной коррекцией (рис. 2.6).

Рассматриваемая система содержит три вида обратных связей:

- 1 По напряжению — оценивается величиной напряжения обратной связи по напряжению  $U_{ОН} = k_H U_{ДВ}$ ;  $U_{ДВ} = U_d = k_{ТП} U_3$ .  $k_H = \frac{R_2}{R_1 + R_2}$  — коэффициент обратной связи по напряжению.
- 2 ОС по току — формируется или по цепи постоянного тока на шунтовом резисторе  $R_{ш}$  или по цепи переменного тока на трансформаторах тока. Напряжение обратной связи по току определяется по формуле  $U_{ОТ} = k_T I_{ДВ}$ ;  $k_T = \frac{R_{ш}}{\sum R_{яц}}$  — коэффициент передачи обратной связи по току.
- 3 ОС по скорости — формируется с помощью тахогенератора (БР), сочлененного с валом двигателя, или с использованием тахометрического моста. Сигнал ОС по скорости  $U_{ОС} = k_C \omega_{ДВ}$ , где  $k_C = \frac{U_{ТГ}}{\omega_{ДВ}}$  — это отношение напряжения на выходе тахогенератора к скорости его вращения.

Указанные обратные связи позволяют формировать статические характеристики, имеющие вид, показанный на рис. 2.7.

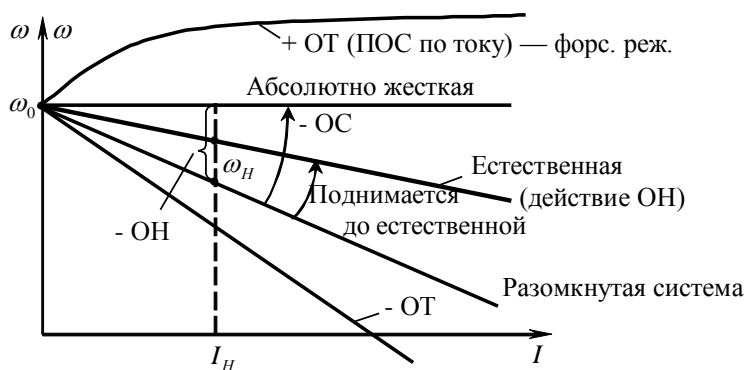


Рисунок 2.7 – Статические характеристики

Положительная обратная связь (ПОС) по току — для реализации форсированного режима (+ОТ обозначено). Отрицательная обратная связь по току (–ОТ) сбрасывает скорость.

Для отрицательной обратной связи по скорости (–ОС) предельной характеристикой является абсолютно жесткая.

### 2.1.3 Статика узла с отрицательной обратной связью по напряжению

Цель анализа: оценить действие обратной связи по напряжению на жесткость электро-механических характеристик (см. рис. 2.7).

- 1 Графическая оценка на основе анализа физических явлений, протекающих в замкнутой системе с ОС по напряжению (рис. 2.8).

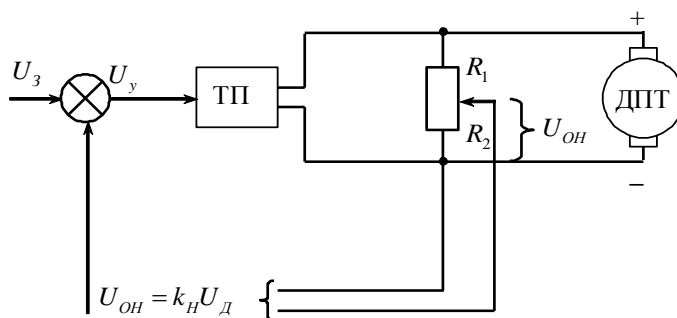


Рисунок 2.8 – Реализация обратной связи по напряжению

- 2 Составление уравнения электромеханической характеристики для узла с ОС по напряжению (рис. 2.9).

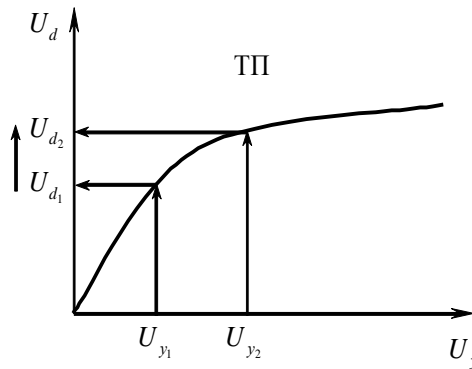


Рисунок 2.9 – Действие обратной связи по напряжению

Методика анализа:

1 Цепочка преобразований (уравнение замыкания):

$$I_D \uparrow \Rightarrow U_d \downarrow \Rightarrow (U_{OH} = k_H U_D) \downarrow \Rightarrow (U_y = U_3 - U_{OH}) \uparrow \Rightarrow \begin{matrix} U_D \uparrow \\ \omega_D \uparrow \end{matrix}.$$

По содержанию первый метод объясняется цепочкой преобразований и графическим построением (рис. 2.10).

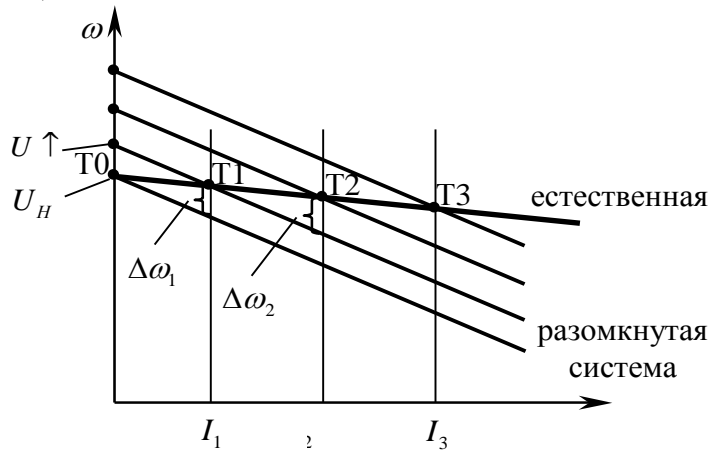
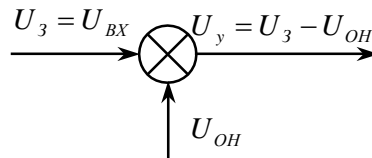


Рисунок 2.10 – Формирование электромеханической характеристики

2 Аналитический метод.

Заключается в составлении алгебраической системы уравнений, описывающей поведение элементов, входящих в систему.

1 Уравнение замыкания:



$$U_y = U_{BX} - U_{OH} = U_3 - U_D k_H.$$

$$2 \quad R_{ТП}, k_{ТП}, E_{ТП} = U_d; E_{ТП} = U_y k_{ТП}.$$

$$3 \quad U_{ДВ} = U_d = E_{ТП}.$$

$$4 \quad \omega = \frac{U_{ДВ}}{k\Phi} - I \frac{R_D}{k\Phi}.$$

При совместном решении приведенных уравнений получается уравнение статической характеристики узла с обратной связью по напряжению.

$$\omega = \omega_0 - \Delta\omega = \frac{U_{ДВ}}{k\Phi(1+k_{ТП}k_H)} - \frac{I(R_{II} + R_{ДВ}(1+k_{ТП}k_H))}{k\Phi(1+k_{ТП}k_H)},$$

где  $U_{ДВ} = k_{ТП}U_{ВХ}$ ;

$$\omega_0 = \frac{U_{ВХ}k_{ТП}}{k\Phi(1+k_{ТП}k_H)} = \frac{U_{ВХ}k_{ТП}k_D}{1+k_{ТП}k_H},$$

где  $\frac{1}{k\Phi} = k_D$ ;  $k_{ТП}k_D$  — коэффициент передачи системы;  $k_{ТП}k_D = k_{РС}$  — коэффициент передачи разомкнутой системы.

$$k_{ЗС} = \frac{k_{РС}}{1+k_{ТП}k_H}.$$

Полученные выражения позволяют сделать следующие выводы:

- 1 Коэффициент передачи замкнутой системы ослабляется  $k_{ЗС} < k_{РС}$  в  $(1+k_{ТП}k_H)$  раз.
- 2 В замкнутой системе для получения необходимой жесткости характеристики входное напряжение нужно увеличить в  $(1+k_{ТП}k_H)$  раз.
- 3 Статическая характеристика для узла с обратной связью — линейная.
- 4 Предельной характеристикой является естественная характеристика.

Для этого рассмотрим предел  $\Delta\omega$ :

$$\lim \Delta\omega = -I \frac{(R_{II} + R_{ДВ}(1+k_{ТП}k_H))}{k\Phi(1+k_{ТП}k_H)} = -\left( \frac{\lim IR_{II}}{k\Phi(1+k_{ТП}k_H)} + \lim I \frac{R_{ДВ}(1+k_{ТП}k_H)}{k\Phi(1+k_{ТП}k_H)} \right) = -\lim \frac{IR_{ДВ}}{k\Phi} = \Delta\omega$$

естественная характеристика.

При  $k_{ТП} \uparrow$  резко увеличивается,  $k_{ТП} = 0 \dots 40$ .

При значительном увеличении  $k_{ТП}$  первый предел стремится к нулю.

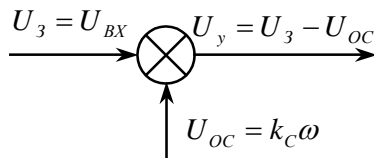
#### 2.1.4 Статика узла с обратной связью по скорости

Цель и методика исследования аналогичны предыдущей.

Методика анализа:

##### 1 Графический метод оценки характеристики.

$$I_H \uparrow \Rightarrow \omega \downarrow \Rightarrow k_C \omega \downarrow \Rightarrow (U_3 - k_C \downarrow \omega) \Rightarrow U_d \uparrow \Rightarrow U_d \uparrow \Rightarrow \omega \uparrow.$$



При действии –ОС при возрастании нагрузки от  $I_0$  до  $I_3$  наблюдаются просадки скорости. Для  $I_1$  будет  $\Delta\omega_1$ ,  $I_2$  —  $\Delta\omega_2$ ,  $I_3$  —  $\Delta\omega_3$  (рис. 2.11). Это явление приводит (на основе уравнения замыкания) к созданию повышенного напряжения на выходе ТП. Электропривод переходит на более высокие характеристики. При этом образуются рабочие точки  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_3$ , лежащие на абсолютно жесткой характеристике. Таким образом, формируется рабочая характеристика для узла с –ОС, которая соответствует абсолютно жесткой характеристике.

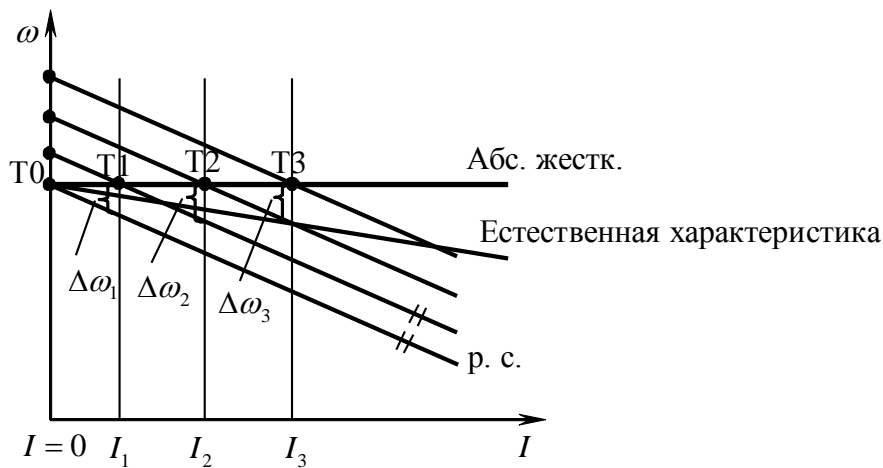


Рисунок 2.11 – Формирование электромеханической характеристики

## 2 Аналитический метод.

Базируется на составлении алгебраических уравнений элементов, входящих в систему.

- 1  $U_y = U_3 - k_c \omega$  — уравнение замыкания.

- 2  $U_d = k_{\text{ТП}} U_y$  — ТП.

- 3  $U_{\text{ДВ}} = U_d$ .

- 4  $\omega = \frac{U_{\text{ДВ}}}{k\Phi} - \frac{IR_{\text{ЯЦ}}}{k\Phi}$ .

В приведенных выше четырех уравнениях принимаем  $y = I$ ,  $x = \omega$ , избавляемся от  $U_y$  и переходим к  $U_{\text{ВХ}}$ :

$$\omega = \omega_0 - \Delta\omega = \frac{U_{\text{ВХ}} k_{\text{ТП}} k_{\text{Д}}}{1 + k_{\text{ТП}} k_{\text{С}}} - I_{\text{Д}} \frac{R_{\text{П}} + R_{\text{Д}}}{(1 + k_{\text{ТП}} k_{\text{С}}) k\Phi}.$$

Анализ уравнения:

- 1 Коэффициент передачи в замкнутой системе уменьшается в  $(1 + k_{\text{ТП}} k_{\text{С}})$  раз;  $k_{\text{ЗС}} < k_{\text{РС}}$ .
- 2 В замкнутой системе необходимо повышать напряжение задания в  $(1 + k_{\text{ТП}} k_{\text{С}})$  раз.
- 3 Характеристика линейная.
- 4 Предельной характеристикой для –ОС является абсолютно жесткая характеристика, что следует из анализа просадки скорости ( $\lim \Delta\omega \rightarrow 0$ ).

Сравнительная оценка узлов с –ОН и –ОС позволяет сделать следующие выводы:

- 1 –ОН охватывает только часть элементов системы, предельной характеристикой является естественная характеристика; эффективность действия невысокая.
- 2 –ОС охватывает все элементы системы; предельной характеристикой является абсолютно жесткая характеристика; эффективность действия выше.
- 3 При замыкании системы коэффициент передачи системы уменьшается.
- 4 При замыкании системы надо подавать на систему повышенное напряжение задания.

### 2.1.5 Статика узла с обратными связями по току

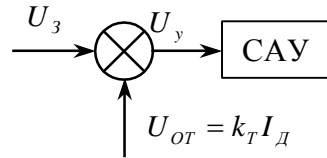
Здесь возможно как положительное, так и отрицательное значение обратной связи.

Выясним влияние обратной связи на величину жесткости статической характеристики.

Методика анализа:

- 1 *Графический метод.* Цепочка преобразований:

$$I_D \uparrow \Rightarrow \omega \downarrow \Rightarrow U_{OT} = k_T I_D \uparrow \Rightarrow U_y \downarrow \Rightarrow U_d \downarrow \Rightarrow \omega_D \downarrow.$$



$$\left. \begin{array}{l} \downarrow U_y = U_3 - k_T I_D \uparrow \\ \uparrow U_y = U_3 - k_c \omega \downarrow \end{array} \right\} \text{— разница между уравнениями.}$$

При работе на упор нужно сбрасывать скорость. Но при этом круто падающая часть характеристики начинается со скорости идеального холостого хода, что не всегда необходимо, поэтому необходимо применять задержанную отрицательную обратную связь (–ОТ с отсечкой) (рис. 2.12). Она действует только при чрезмерных нагрузках, ограничивая величину скорости и вращательного момента, тем самым защищая привод от поломки.

–ОТ нужна для ограничения моментов и скорости.

$$+OT: U_y = U_3 + k_T I_D \Rightarrow U_y \uparrow.$$

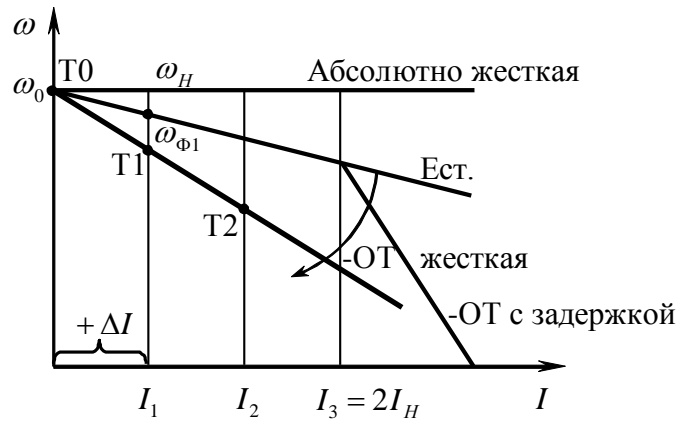


Рисунок 2.12 – Действие отрицательной обратной связи по току

При положительной обратной связи происходят следующие явления (рис. 2.13):

$$I_D \uparrow \Rightarrow (U_{OT} = k_T I_D) \uparrow \Rightarrow (U_3 + k_T I_D) \uparrow \Rightarrow U_y \uparrow \Rightarrow U_d \uparrow \Rightarrow \omega_D \uparrow.$$

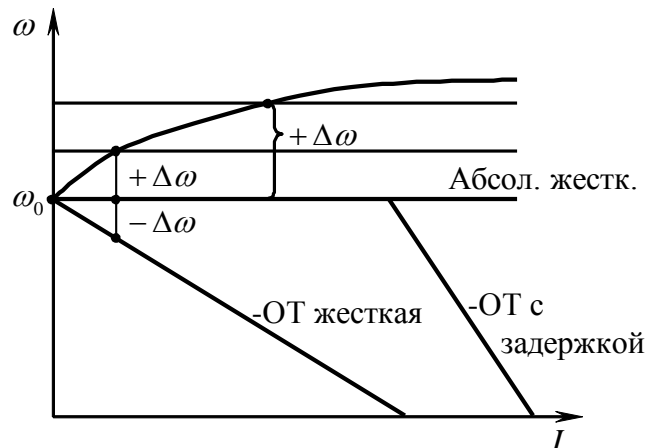
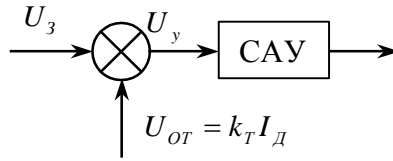


Рисунок 2.13 – Действие положительной обратной связи по току

Положительная токовая обратная связь применяется для реализации форсированных режимов при небольших перегрузках.



2 Метод составления уравнения электромеханической характеристики.  
Применяется вышеприведенная методика.



$$\omega = \omega_0 \pm \Delta\omega = \frac{U_d}{k\Phi} \mp I \frac{(R_n + R_d)}{k\Phi} (1 \mp k_{ТП} k_T),$$

где  $(1 \mp k_{ТП} k_T)$  — знак «минус» берем для положительной обратной связи по току (+ОТ), а «плюс» — для отрицательной (–ОТ).

### 2.1.6 Статика узлов с задержанными обратными связями

Кроме обычных обратных связей (жестких), которые существуют во всех режимах, существуют гибкие или задержанные ОС, которые или прекращают свою работу, или, наоборот, включаются при достижении определенных значений регулируемых параметров. В этом случае формируется многоэлементная характеристика, состоящая из нескольких участков (рис. 2.14).

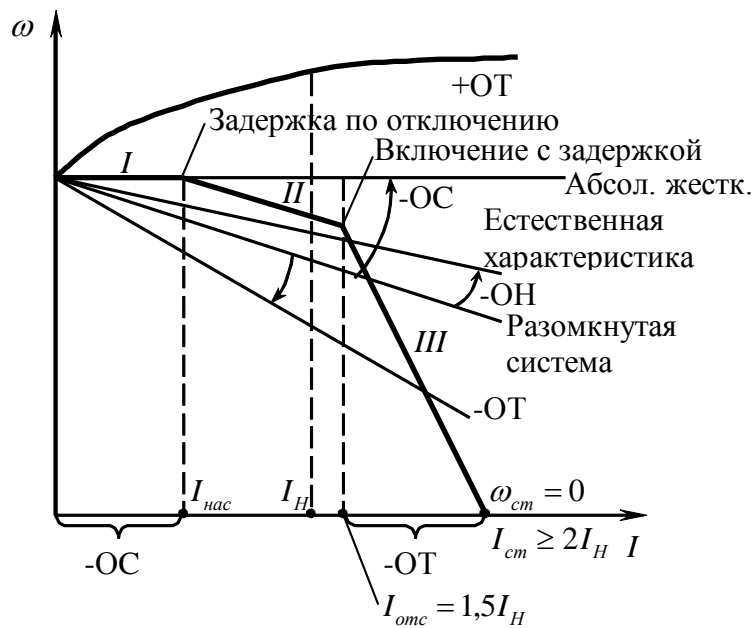
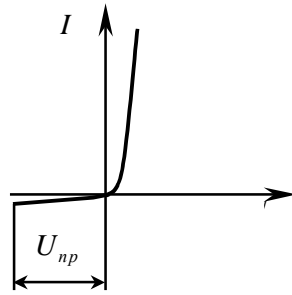


Рисунок 2.14 – Формирование многоэлементной характеристики

Полученная трехэлементная статическая характеристика образуется следующим образом: на первом участке (I) действует –ОС, она формирует абсолютно жесткую характеристику, в дальнейшем, при увеличении нагрузки необходимо снижать скорость (начинать ограничивать). Это начинается при значении тока  $I_{нас}$  (ток насыщения). Таким образом, при  $I_{дв} = I_{нас}$  обратная связь по скорости отключается. Тогда формируется второй участок (II), аналогичный разомкнутой системе. При достижении током двигателя тока отсечки  $I_{отс} = 1,5I_H$  включается –ОТ, и формируется третий круто падающий участок (III), в результате чего двигатель останавливается, ток стопорения  $I_{см} \geq 2I_H$ , а  $\omega_{см} = 0$ .

В качестве механизма для включения или отключения обратных связей используются или выключатели, или стабилитроны с опорным напряжением:

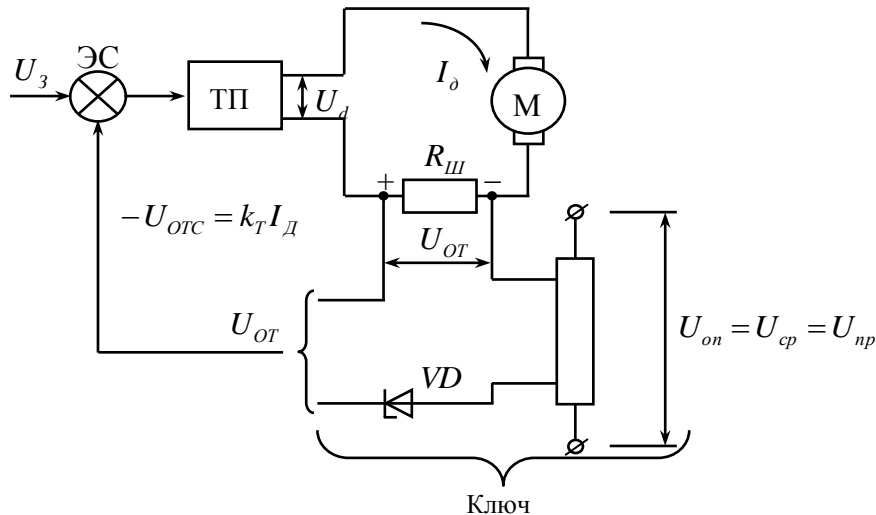


$U_{on} > U_{om}$  — стабилитрон закрыт, обратной связи по току нет.

$U_{on} < U_{om}$  — стабилитрон пробивается, обратная связь по току существует –ОТ.

Стабилитрон  $VD$ , подключенный в цепь с двумя источниками питания  $U_{om}$  и  $U_{on} = U_{cp}$ , выполняет функцию ключа, который или подключает –ОТ, или отключает ее

(рис. 2.14). При малых токах нагрузки  $U_{om}$  незначительное, стабилитрон закрыт, и –ОТ не подключена. При достижении тока отсечки  $U_{om} \uparrow$  и превышает  $U_{on}$ , что приводит к пробое стабилитрона, то есть к подключению –ОТ.



$U_{on}$  — опорное напряжение;  $U_{cp}$  — напряжение сравнения;

$U_{пр}$  — напряжение пробоя стабилитрона;  $U_{om}$  — напряжение отсечки

Рисунок 2.14 – Реализация задержанной обратной связи по току

### 2.1.7 Статика системы с подчиненным регулированием и последовательной коррекцией

Все предыдущие варианты формирования характеристик рассматривались для систем с так называемой параллельной коррекцией (рис. 2.15). В такой системе уравнение замыкания будет:

$$U_{y_i} = U_3 - U_{oc_i}.$$

Все контуры работают независимо, но параллельно друг другу. Неудобство: сложность синтеза, в каждом контуре должен быть задатчик и регулятор.

*Недостатки такой системы:*

- 1 Необходимость в нескольких задатчиках.
- 2 Необходимость в нескольких регуляторах (по числу регулируемых параметров).
- 3
- 4 Сложность синтеза.

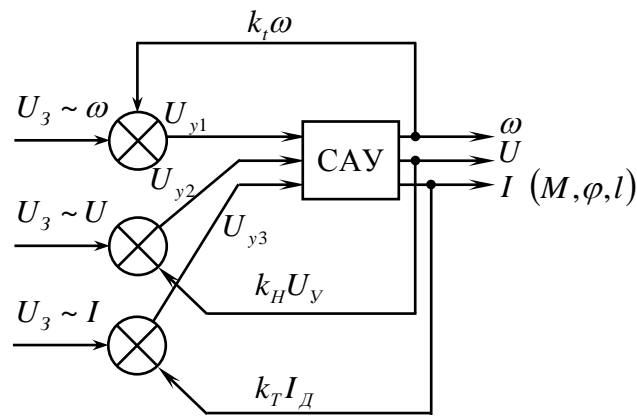


Рисунок 2.15 – Система с параллельной коррекцией

В настоящее время получила распространение теория подчиненного регулирования с последовательной коррекцией (рис. 2.16).

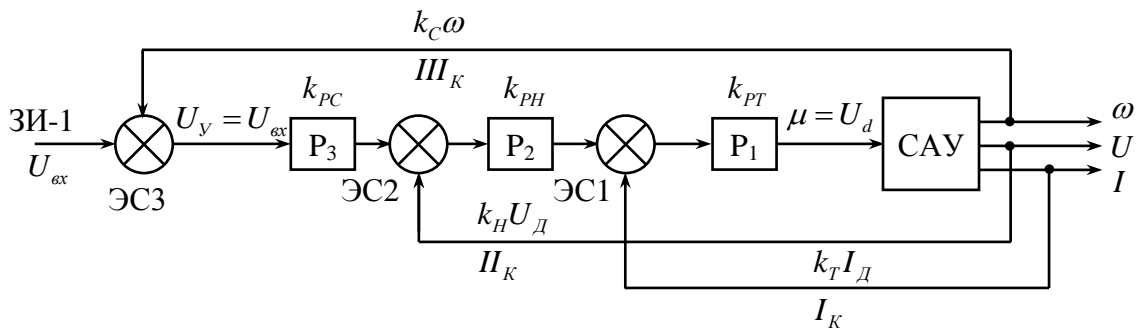


Рисунок 2.16 – Система с последовательной коррекцией регулируемых параметров

Особенности системы:

- 1 Выделяется основной параметр:  $\omega$  и параметры, подчиненные основному параметру. Такими параметрами являются сила тока  $I$  и напряжение  $U$ .
- 2 Выделяются контуры управления:
  - $I_K$  — внутренний, контур тока;
  - $II_K$  — внутренний, контур напряжения;
  - $III_K$  — внешний, контур скорости.

Первые два являются подчиненными. (Нумерация идет справа налево.)

- 3 Используется один задатчик интенсивности. Или задается значение основного параметра  $\omega$ . На систему действует напряжение задания  $\mu$ .
- 4 Все регуляторы в рассматриваемой системе включены последовательно как последовательные корректирующие звенья. В них производится переработка или обработка задающего сигнала с учетом действия всех обратных связей.
- 5 Системы с последовательной коррекцией отличаются относительной простотой синтеза.
- 6 Оптимизация контуров регулирования начинается с внутреннего контура на основе идеи последовательной коррекции.

$$W(p)_{жс} = W(p)_p W(p)_{кз} \Rightarrow W(p)_{кз} = W(p)_{pez} = \frac{W(p)_{жс}}{W(p)_p},$$

где  $W(p)_{кз}$  — передаточная функция корректирующего звена (или ПФ регулятора  $W(p)_{pez}$ );

$W(p)_p$  — передаточная функция реальной системы;

$W(p)_{жс}$  — передаточная функция желаемой системы.

Для анализа статических характеристик пользуются методикой, используемой в предыдущих узлах.

Уравнение в общем виде представлено известным способом:

$$\omega = \omega_0 - \Delta\omega; \quad \omega_0 = \frac{U_{вх} k_{pc} k_{pn} k_{pm} k_{mn}}{(1 + k_{pc} k_{pn} k_{pm} k_{mn} k_c) k\Phi},$$

где  $k_{pc}$  — регулятор скорости;  $k_{pn}$  — регулятор напряжения;  $k_{pm}$  — регулятор тока;  $k_c$  — коэффициент обратной связи по скорости;  $k_{mn}$  — коэффициент передачи ТП.

$$k_\delta = \frac{1}{k\Phi}; \quad \omega_0 = \frac{U_{вх} k_{pc} k_{pn} k_{pm} k_{mn} k_\delta}{(1 + k_{pc} k_{pn} k_{pm} k_{mn} k_c k_\delta k')}; \quad \Delta\omega = -I \frac{R_{яц}}{1 + k_{pc} k_{pc} k_{pm} k_{mn} k_c k_\delta},$$

где  $k_\delta$  — коэффициент передачи двигателя;  $k'$  — коэффициент, учитывающий действие токовой отрицательной обратной связи.

Поскольку токовая обратная связь является отрицательной, то:

- 1  $\left. \begin{matrix} I_\delta < I_{омс} \\ k' < 1 \end{matrix} \right\}$  — ОТ отсутствует.  $\Delta\omega$  находится на уровне номинальной.
- 2  $\left. \begin{matrix} I_\delta > I_{омс} \\ k' > 1 \end{matrix} \right\}$  — ОТ присутствует.  $\Delta\omega \uparrow$  резко возрастает.

Реализация задержанных обратных связей осуществляется с помощью специальных ключей, выполненных на так называемых нелинейных звеньях.

$K_{л1}$  — НЗ№1: зона нечувствительности (в первом контуре) (рис. 2.17).

$K_{л2}$  — НЗ№2: зона насыщения (рис. 2.18).

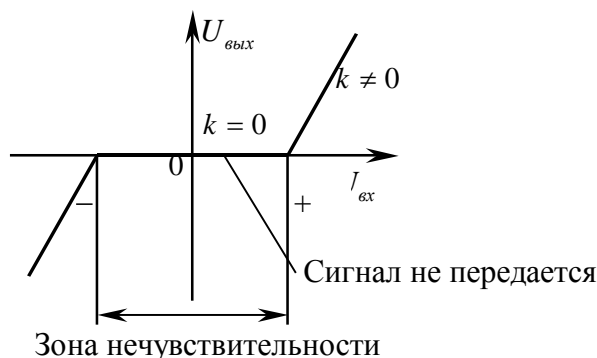


Рисунок 2.17 – Зона нечувствительности

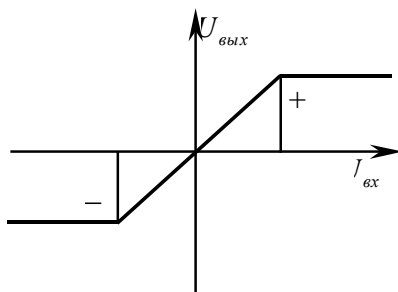


Рисунок 2.18 – Зона насыщения

Генератор вырабатывает сигнал до насыщения сердечника. Возрастает нагрузка, возрастает  $U_{BX}$  или  $U_Y$ . Звено насыщения приводит к тому, что –ОС отключается.

Как только ток нагрузки возрос, включается –ОТ (для зоны нечувствительности).

В результате действия ключей формируется трехэлементная характеристика (рис 2.20).

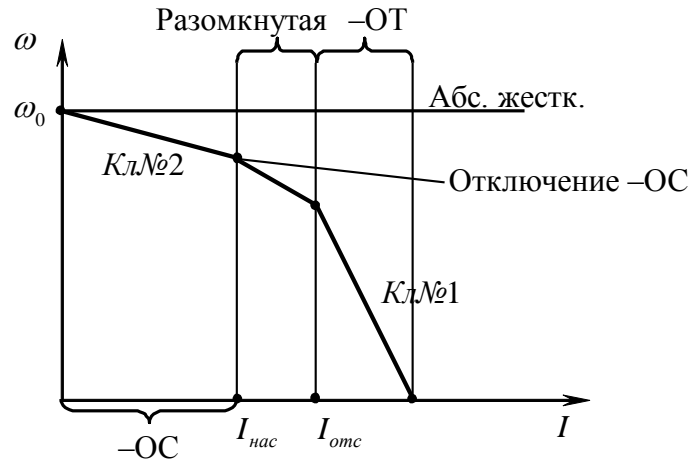


Рисунок 2.20 – Формирование трехэлементной характеристики

### 2.1.8 Статический режим двухконтурной системы с подчиненным управлением (для регулируемого электропривода с обратными связями с отсечками по скорости и по току)

Двухконтурная система регулирования скорости (САУ РЭП) представлена на рис. 2.21, а аппаратная реализация нелинейных элементов «зона насыщения» и «зона нечувствительности» - на рис. 2.22.

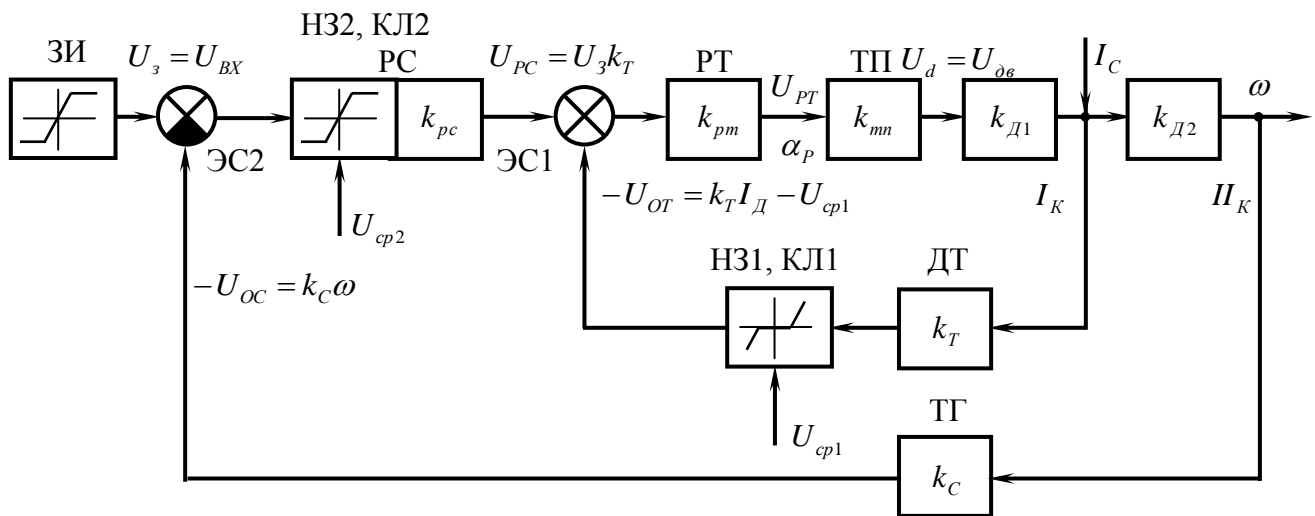


Рисунок 2.21 – Двухконтурная система регулирования скорости

ЗИ — задатчик интенсивности: задает сигнал определенной интенсивности до определенного уровня (это не зона насыщения).

$U_{PC}$  — выходное напряжение регулятора скорости;

$U_{зКТ}$  — задающее напряжение контура тока ( $U_{PC} = U_{зКТ}$ ).

ЭС1 — задание для него  $U_{зКТ}$ , а сигнал ОС — по току.

(Обратная связь по току в такой системе может реализовываться или по цепи постоянного тока по  $R_{ш}$ , или по цепи переменного тока через трансформаторы тока (ТТ), выпрямитель и усилитель);

ДТ — датчик тока;

НЗ1 или КЛ1 — зона нечувствительности;

$U_{ср2} = U_{опорное}$  или  $U_{пробоя}$  стабилитронов 3, 4;

$U_{ср1} = U_{опорное}$  или  $U_{пробоя}$  стабилитронов 1, 2.

(Это напряжение сравнения);

$U_{PT}$  — выходное напряжение регулятора тока;

$\alpha_P$  — угол запаздывания или угол регулирования тиристорного преобразователя;

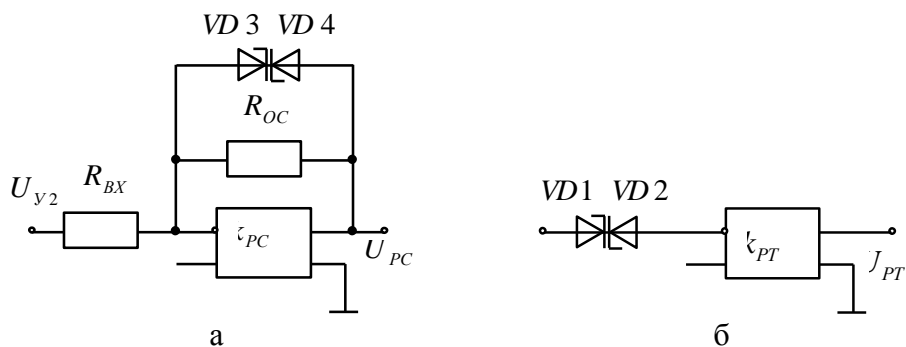
$U_d = U_{дв}$  — напряжение двигателя;

$k_{д1}$  — статорная часть;

$k_{д2}$  — якорная часть;

$I_C$  — статический ток, вызванный силами сопротивления;

$\omega$  — скорость на выходе.



а- зона насыщения , б- зона нечувствительности

Рисунок 2.22 – Аппаратная реализация нелинейных элементов

$$U_{y2} = U_3 - k_c \omega; k_{PC} = \frac{R_{OC}}{R_{BX}}.$$

На рис. 2.23 представлена характеристика стабилитрона, используемого для построения нелинейных звеньев.

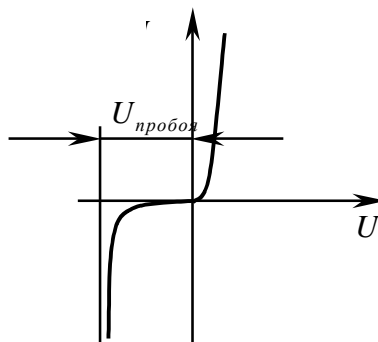


Рисунок 2.23 – Характеристика стабилитрона

Рассматривают два метода построения упорных статических характеристик применительно к рассматриваемой системе:

1  $I_{отс} < I_{нас}$  — когда ток отсечки больше тока насыщения.

$I_{отс}$  — ток отсечки — значение тока, при котором включается –ОТ с отсечкой.

$I_{нас}$  — значение тока, при котором отключается обратная связь по скорости –ОС.

$I_{отс} \sim -ОТ_{отс}$  — вкл;  $I_{нас} \sim -ОС$  — откл.

Это изложено в источнике [2].

2  $I_{отс} > I_{нас}$  — вначале отключаем –ОС, а затем включаем –ОТ.

Этот метод проще по расчету.

### 2.1.9 Методика построения упорной характеристики

Упорная характеристика может быть двух типов, как показано на рис. 2.24.

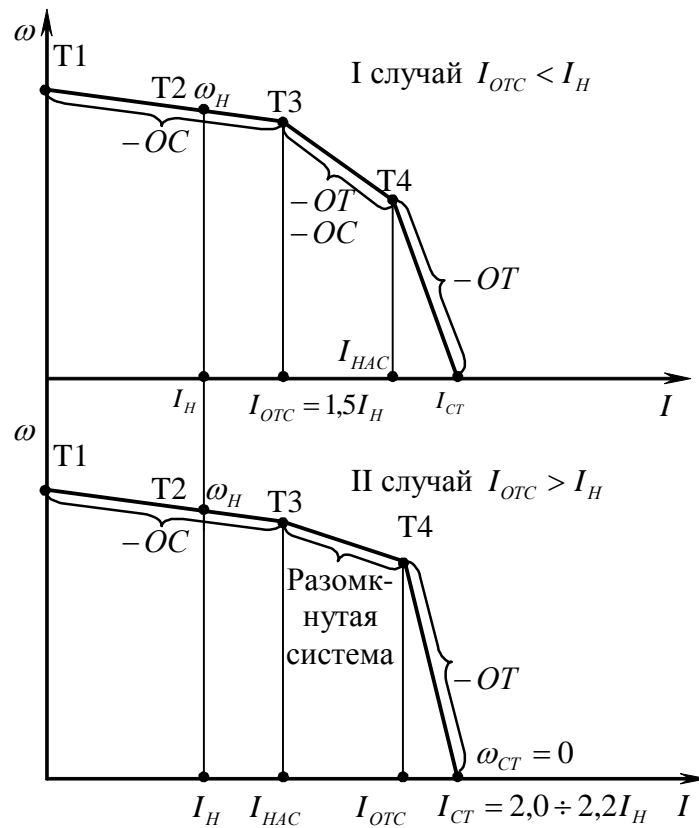


Рисунок 2.24 – Виды упорной характеристики

Методика построения заключается в следующем: выделяются характерные точки на предполагаемой статической характеристике.

*I случай:*

$$T1 \text{ — } (I = 0; \omega = \omega_0);$$

$$T2 \text{ — } (I = I_H; \omega = \omega_H).$$

*Примечание.* Определяют не абсолютные значения скорости, а ее приращения  $\Delta\omega$ . Тогда  $\omega_i = \omega_0 - \Delta\omega_i$ ;  $I = I_H$ ;  $I_{HAC}$ ;  $I_{OTC}$ ;  $I_{CT}$ .

$$T3 \text{ — } (I = I_{OTC}; \omega = \omega_{OTC});$$

$$T4 \text{ — } (I = I_{HAC}; \omega = \omega_{HAC}),$$

где  $I_{HAC}$  и  $\omega_{HAC}$  определяются по формулам, изложенным в источнике [2].

Между точкой T3 и T4 действует как  $-OT$ , так и  $-OC$ , а далее действует только  $-OT$ , резко сбрасывая скорость.

*II случай:*

$$T1 \text{ — } (I = 0; \omega = \omega_0),$$

$$T2 \text{ — } (I = I_H; \omega = \omega_H),$$

$$T3 \text{ — } (I = I_{HAC}; \omega = \omega_{HAC}).$$

*Замечания:*

- 1 При расчетах характеристик расчетные значения  $\omega_{H \text{ расч}} = \omega_{H \text{ насн}}$ .
- 2  $I_{HAC}$  для второго случая задается и составляет  $(1,3...1,4)I_H$ .
- 3 В первом случае  $I_{HAC}$  и  $\omega_{HAC}$  рассчитываются по формулам, приведенным в источнике [2].

*Выводы:*

1 При первом методе расчета, когда  $I_{OTC} < I_{HAC}$ , обратные связи работают в следующем порядке: работает  $-OC$ ; подключается  $-OT$ ; отключается  $-OC$ , и процесс торможения осуществляется только под действием  $-OT$  с отсечкой. При этом характер поведения выходного напряжения тиристорного преобразователя для соответствующих времен действия обратных связей будет иметь вид:

$$-OC: E_{ТП} = (U_3 - k_C \omega) \cdot k_{PC} k_{PT} k_{ТП} k_D,$$

где  $(U_3 - k_C \omega) = U_Y$ .

$$-OC, -OT: E_{ТП} = [(U_3 - k_C \omega) \cdot k_{PC} - (k_T I_D - U_{CP1})] k_{PT} k_{ТП} k_D,$$

где  $(U_3 - k_C \omega) \cdot k_{PC} = U_{3 \text{ К.Т.}}$ .

$$-OT_{OTC}: E_{ТП} = [(U_3 - k_C \omega_{HAC}) \cdot k_{PC} - (k_T I_D - U_{CP1})] k_{PT} k_{ТП} k_D,$$

где  $-OC$  по скорости не разомкнута, она просто перестала действовать.  $E_{ТП}$  — снижается при повышении нагрузки.

Как следует из приведенных выражений, ЭДС на выходе преобразователя уменьшается, что приводит к снижению скорости. Таким образом, сформирована трехэлементная упорная статическая характеристика.

2  $I_{OTC} > I_{HAC}$ .

$$-OC: E_{ТП} = (U_3 - k_C \omega) \cdot k_{PC} k_{PT} k_{ТП} k_D.$$

$$\text{Разомкнутая } E_{ТП} = (U_3 - k_C \omega_{HAC}) \cdot k_{PC} k_{PT} k_{ТП} k_D.$$

$$-OT: E_{ТП} = [(U_3 - k_C \omega_{HAC}) \cdot k_{PC} - (k_T I_{ДВ} - U_{CP1})] k_{PT} k_{ТП} k_D.$$

$k_{PC}$  практически не действует (равен 1) из-за режима насыщения, поэтому им можно пренебречь.

3 Второй метод более прост.

После построения упорной статической характеристики (рис. 2.25) нужно провести проверку тока стопорения путем определения расчетного стопорного тока.

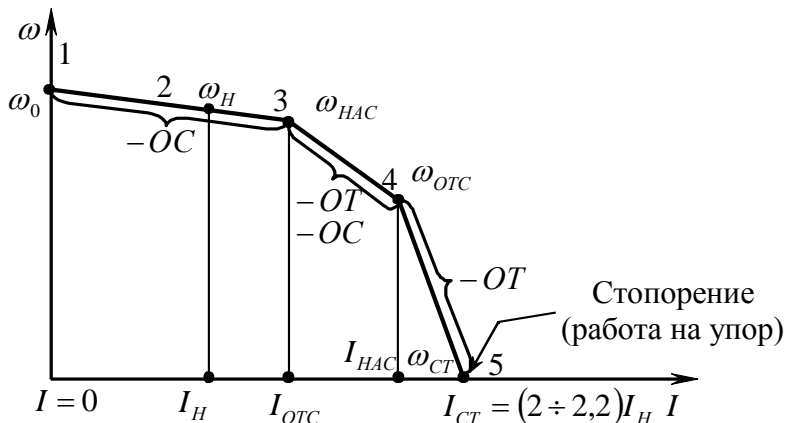




Рисунок 2.25 – Участки упорной характеристики

Погрешность по току  $\Delta_I \leq 5\%$ .

Задаем  $I_{HAC}$ ,  $I_{OTC}$ ,  $I_{CT}$ .

Фактическое расчетное значение тока стопорения

$$I_{CT} = \frac{(U_{PC HAC} + U_{CP1})k_{PT}}{k_T k_{PT} k_{TP} k_D + R_{ЯЦ} k_D},$$

где  $U_{PC HAC}$  — напряжение на выходе  $PC$ , когда скорость достигла  $\omega_{HAC}$  (режим насыщения, рис. 2.26);

$$U_{PC HAC} = (U_3 - k_C \omega_{HAC}) k_{PC}.$$

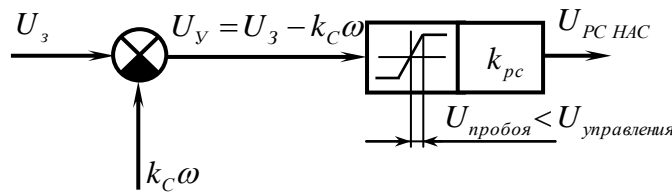


Рисунок 2.26 – Зона насыщения в контуре скорости

Если  $U_Y > U_{пробоя}$  стабилитрона, то он зашунтирует обратную связь, и  $k_{PC}$  не осуществляет дальнейшего преобразования;  $U_{CP1}$  — напряжение сравнения нелинейного звена зоны нечувствительности;  $U_{CP1} = U_{ПР}$  стабилитрона ( $OT$ );  $k_D = \frac{1}{k\Phi}$  — коэффициент передачи двигателя;  $k_T$  — коэффициент передачи по току.

Определение значения  $U_{CP2}$  (рис. 2.27).

$U_{CP2}$  — напряжение, по которому выбирается стабилитрон в контуре скорости.

$$U_{CP2} = U_{ПР СТ \text{ №} 2}.$$

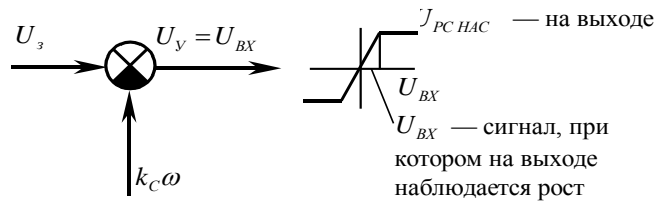


Рисунок 2.27 – Определение значения  $U_{CP2}$

$$U_Y = U_3 - k_C \omega = U_{пробоя} = U_{CP2}.$$

$U_{CP2} = U_3 - k_C \omega_{HAC}$  — для стабилитрона выбираем ближайшее большее значение.

Определение значения  $U_{CP1}$ , то есть напряжения пробоя стабилитрона №1 в контуре тока (рис. 2.28).

При малом сигнале  $\alpha_p$  — максимальный.

$$U_{PC HAC} = k_T I_D - U_{CP1}.$$

Предполагаем, что в конечном итоге доходим до точки стопорения, где  $\omega = 0$ .

$$U_{CP1} = k_T I_D - U_{PC HAC},$$

где  $U_{PC\ HAC} = (U_3 - k_C \omega_{HAC}) k_{PC}$ .

$$k_T = \frac{U_{PC\ HAC}}{I_{CT} - I_{OTC}},$$

где  $I_{CT}$  — ток стопорения;  $I_{OTC}$  — ток отсечки.

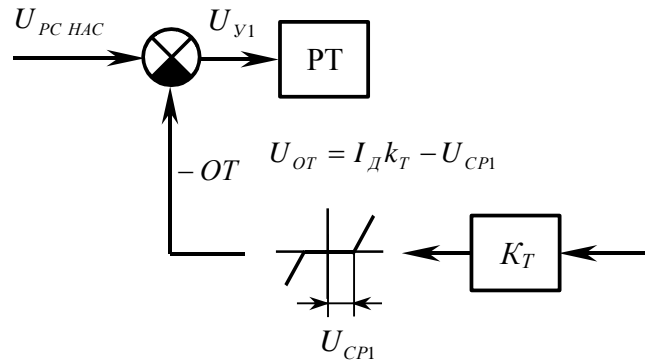


Рисунок 2.29 – Зона нечувствительности в контуре тока

## 2.2 Динамика аналоговых САУ ЭП

$$\left. \begin{aligned} \omega &= f(M_C) \text{ — статика;} \\ i &= f(M_C, t) \end{aligned} \right\} \text{ — динамика.}$$

Причиной появления динамических или переходных режимов или процессов являются возмущающие воздействия:  $U_3 \rightarrow U_{ДВ}$ ; нагрузка  $M_C$ . Переходные процессы по регулируемым параметрам будут иметь следующий вид (рис. 2.30).

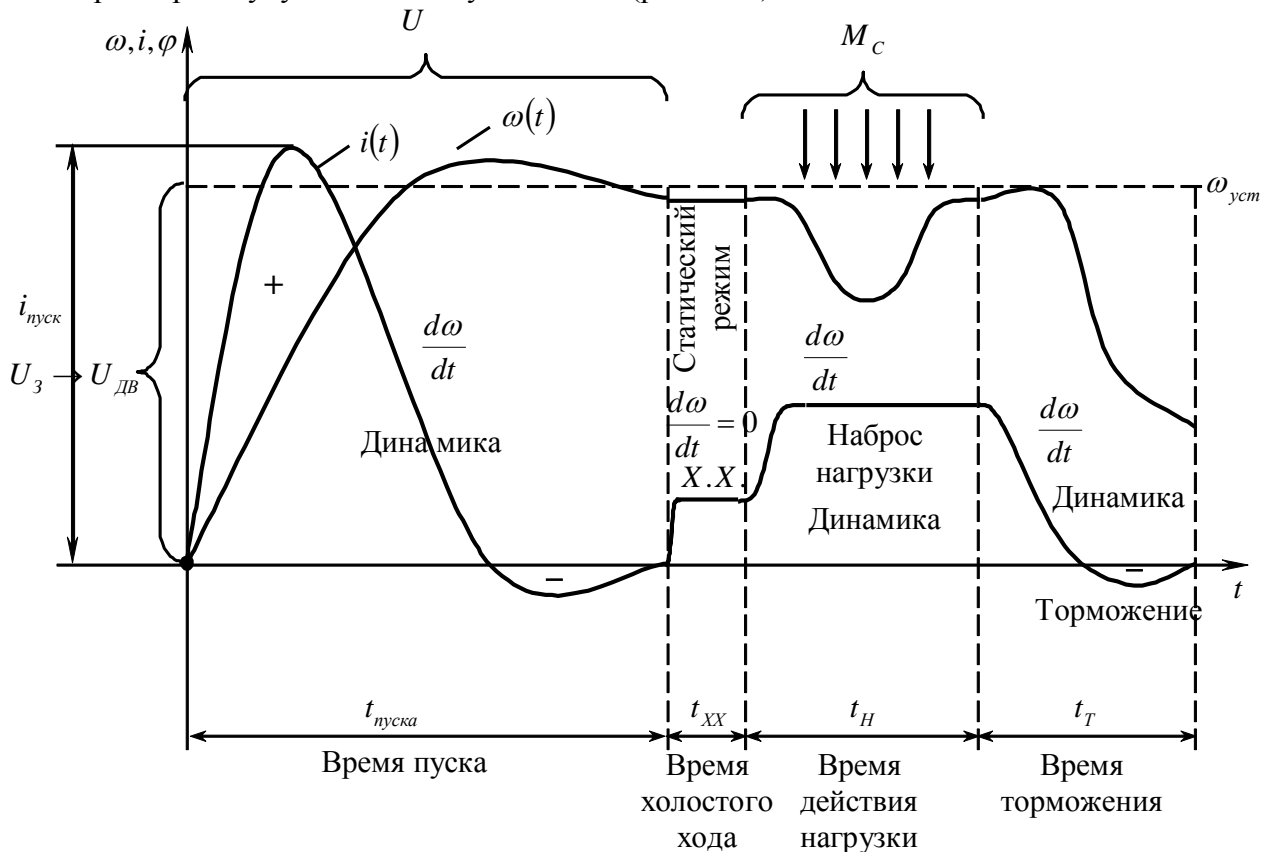


Рисунок 2.30 – Переходные процессы по регулируемым параметрам в ЭП

Отрицательное значение тока принимает в случае появления генераторного режима.

При проверке  $I_{\text{пуск}} = I_{\text{ст}}$  — пусковой ток должен быть равен току стопорения (рис. 2.31).

Появления отрицательного тока из-за того, что скорость превысила скорость идеального холостого хода.

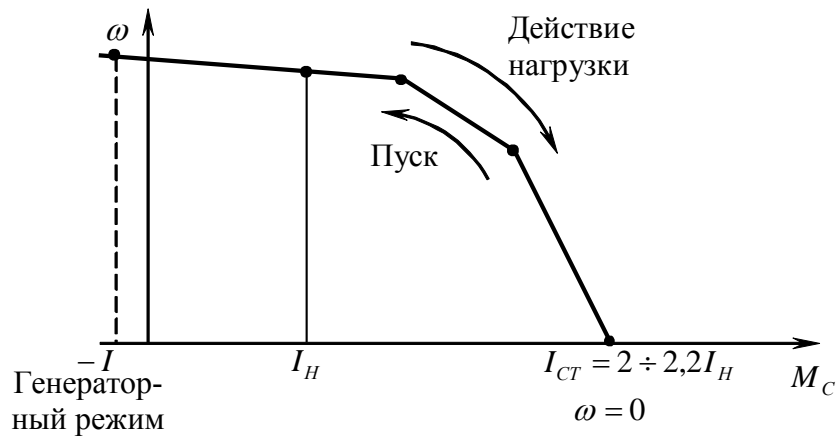


Рисунок 2.31 – Статическая характеристика ЭП

### 2.2.1 Оценки динамического режима

Существуют следующие виды оценки динамического режима:

#### 1 Временные оценки:

- время достижения установившегося значения первый раз  $t_{1y}$ ;
- время регулирования  $t_p = 3 \div 4T$ , где  $T$  — инерционность системы;
- время первого максимума.

#### 2 Точностные показатели:

- $\sigma_{\text{дин}} = \frac{(X_{\text{max}} - X_{\text{уст}})}{X_{\text{уст}}}$  — динамическая погрешность или перерегулирование;
- статическая погрешность  $\sigma_{\text{ст}} = \frac{X_0 - X}{X_0} \cdot 100\%$  .
- относительный диапазон колебаний  $2\Delta$  .

### 2.2.2 Математический аппарат для описания динамики

Для описания динамики используется следующий математический аппарат:

#### 1 Дифференциальные уравнения

Пример. Уравнение электрического баланса

$$U_c = \Delta U_{\text{я}} + E_{\text{np}} + e_s = I_{\text{я}} R_{\text{я}} + k\Phi \omega + L \frac{dI}{dt} .$$

$d \rightarrow \Delta$   $d$  заменяем на  $\Delta$  и находим значение  $\Delta i$  .

#### 2 Переходные характеристики (графическое решение дифференциального уравнения)

Его находят по общему решению дифференциального уравнения в зависимости от вида корней (рис. 2.32, 2.33).

Корни дифференциального уравнения:

а) вещественный корень  $p = \pm\alpha$ ;  $\Delta y = Ce^{\pm\alpha t}$ ;

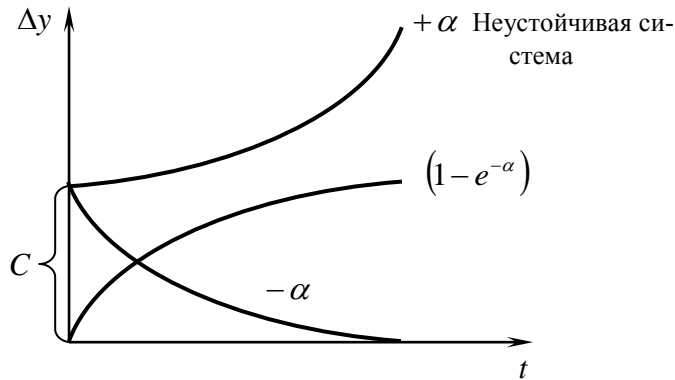


Рисунок 2.32 – Графическая интерпретация решения дифференциального уравнения для вещественных корней

б) комплексные корни:

$p = \pm\alpha \pm j\beta$  — колебательный переходной процесс.

$$\Delta y = C \cdot \cos(\omega t + \gamma) e^{-\alpha t}, \quad \beta = \omega.$$

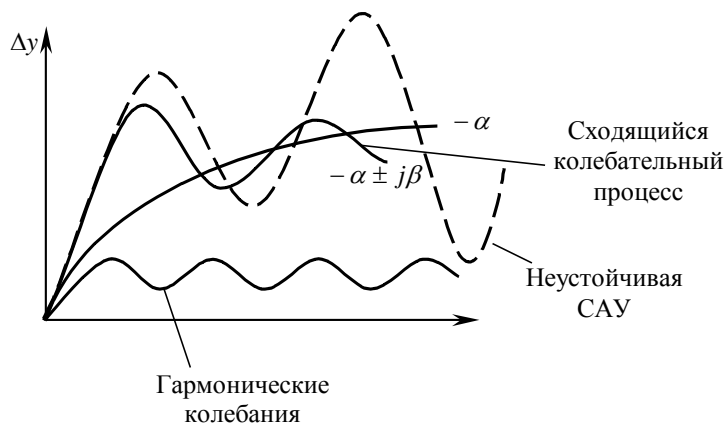
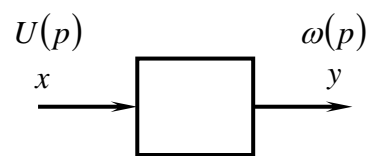


Рисунок 2.33 – Графическая интерпретация решения дифференциального уравнения для комплексных корней

### 3 Передаточная функция (рис. 2.34).



$$W_{\text{дпт}}(p) = \frac{\Delta \omega(p)}{\Delta U(p)}, \quad U \rightarrow \omega;$$

$$W(p) = \frac{\Delta y(p)}{\Delta x(p)},$$

где  $\Delta y(p)$ ,  $\Delta x(p)$  — приращения изображения;  $y(t)$  — оригинал;  $y(p)$  — изображение;

$p = \alpha \pm j\beta$  — комплексное число;  $p = \frac{d}{dt}$  — оператор дифференцирования.

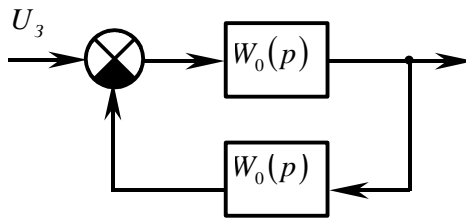


Рисунок 2.34 – ПФ замкнутой системы

$$W_3(p) = \frac{W_0(p)}{1 + W_0(p) \cdot W_{oc}(p)}.$$

#### 4 Амплитудно- и фазочастотные характеристики (АЧХ, ФЧХ) (рис. 2.35).

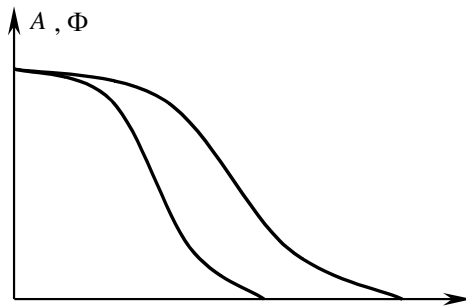


Рисунок 2.35 – Вид АЧХ и ФЧХ

#### 5 Логарифмические амплитудно- и фазочастотные характеристики (ЛАЧХ, ЛФЧХ).

### 2.3 Передаточные функции звеньев, входящих в систему ЭП

Звено системы представляется в виде ПФ.

Элемент системы — по функциональному назначению.

Составные части САУ:

- 1) элемент САУ — используется схема, имеющая структуру, — функциональная схема.
- 2) звено САУ — передаточная функция — структурная схема.

Рассмотрим составляющие звенья системы:

#### 5 Задатчик интенсивности ЗИ (рис. 2.36).

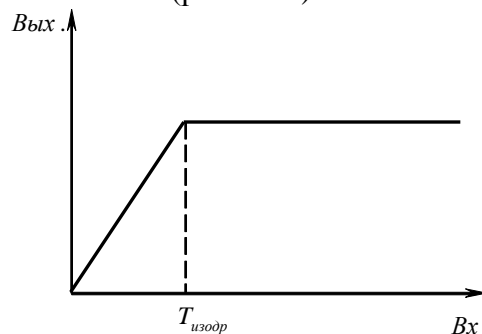


Рисунок 2.36 – Характеристика задатчика интенсивности

$T_{изодр}$  — время изодрамы — время, по истечении которого заканчивается возмущающее воздействие.

$$W(p) = \frac{1}{Tp} = \frac{K}{p}; \quad \frac{1}{T} = K \text{ — интегрирующее звено.}$$

6 ЭС — элемент сравнения.

ПФ отсутствует, это только элемент системы.

7 ОС по напряжению, скорости к току.

$k_H$  — по напряжению ОС.

$k_C$  — по скорости ОС.

$k_T$  — по току ОС.

Перечисленные выше звенья могут быть усилительными, пропорциональными, масштабирующими.

$$W(p) = K = \frac{\Delta y}{\Delta x}.$$

8 Регуляторы.

Регулятор — устройство для регулирования управляющего воздействия в системе. Виды регуляторов представлены в табл. 2.1.

9 Тиристорный преобразователь:

10

*а) усилительное звено*

$$W_{ТП}(p) = k_{ТП},$$

где  $k_{ТП}$  определяется по кривой «вход-выход» и будет равно  $k_{ТП} = \frac{\Delta U_d}{\Delta U_y}$  (рис. 2.37).

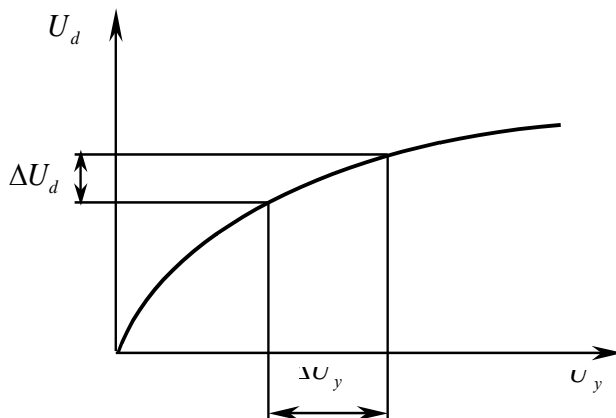


Рисунок 2.37 – Графическое определение коэффициента передачи преобразователя

*б) апериодическое звено*

$$W(p) = \frac{k_{ТП}}{T_{ТП}p + 1},$$

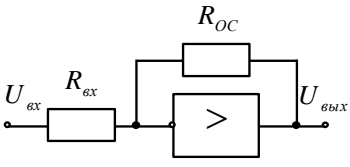
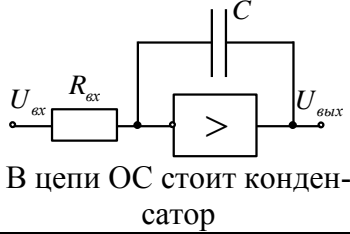
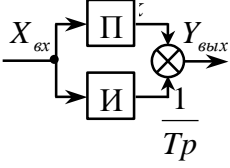
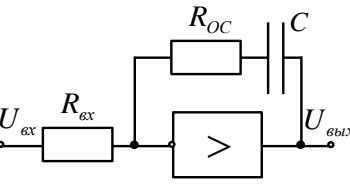
где  $k_{ТП}$  аналогично предыдущему;  $T_{ТП} = 0,005...0,01$  — постоянная времени на входе в фильтр и обозначается  $T_{ТП} = T_{\mu}$  — малая некомпенсированная постоянная;

в) комбинация усилительного звена и звена запаздывания

$$W_{\text{П}}(p) = ke^{-\tau p}, \tau = \frac{0,5}{mf},$$

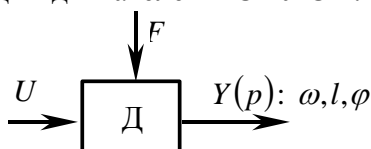
где  $m$  — число фаз;  $f$  — частота питающей сети.

**Таблица 2.1 – Виды регуляторов**

Закон регулирования	Вид регулятора	Дифференциальное уравнение	$W(p)$	Электронная схема	Примечание
1. Пропорциональный закон	П	$\Delta y = k\Delta x$	$k$		$k = \frac{\Delta U_{\text{вых}}}{\Delta U_{\text{вх}}} = \frac{R_{\text{ос}}}{R_{\text{вх}}}$
2. Интегральный закон	И	$\Delta y = \int_{t_1}^{t_2} \Delta x dt$	$\frac{k}{p}$	 В цепи ОС стоит конденсатор	$k_{\text{инт}} = \frac{1}{T}$ $T = R_{\text{вх}} C$
3. Пропорционально-интегральный закон	ПИ	$\Delta y = k_y \Delta x + k_u \int_{t_1}^{t_2} \Delta x dt$	Структурная схема ПИ-регулятора  $W_{\text{ПИ}}(p) = W_{\text{П}}(p) + W_{\text{И}}(p) = k + \frac{1}{Tp} = \frac{kTp + 1}{Tp} = \frac{kp + \frac{1}{T}}{p}$		$T_1 = R_{\text{ос}} C$ $T_2 = R_{\text{вх}} C$ $R_{\text{вх}} = 10 \text{ кОм}$ и $C = 1 \text{ мкФ}$ — задаются

11

12 Передаточные функции двигателей в САУ ЭП.



$\omega$  — угловая скорость вращения;

$l$  — линейное перемещение;

$\varphi$  — угловое перемещение.

Рассматриваются два вида передаточных функций:

а) по управляющему воздействию  $W(p) = \frac{\omega(p)}{U(p)}$ ;

б) по возмущающему воздействию  $W(p) = \frac{\omega(p)}{F(p)}$ .

Двигатели делятся на следующие виды:

- 1 Двигатели постоянного тока (момент создается постоянным током). Вход —  $U_c$ ; выход —  $\omega$ .
- 2 Асинхронные двигатели (АД). Выходной параметр —  $\omega$  или  $S$ ; вход —  $U_c$ . (ротор не синхронно вращается с магнитным потоком).

*Асинхронные двигатели*

$$W(p) = \frac{k_d}{T_d p + 1}.$$

$$k_d, T_d = f(U_\phi, R, S).$$

$$k_d = f(U_\phi) = \frac{\omega_c}{U_\phi} - \frac{S_k \omega_c U_c}{2k_M U_\phi^2},$$

где  $S_k$  — критическое скольжение;  $\omega_c$  — синхронная скорость.

Механическая характеристика АД представлена на рис. 2.38.

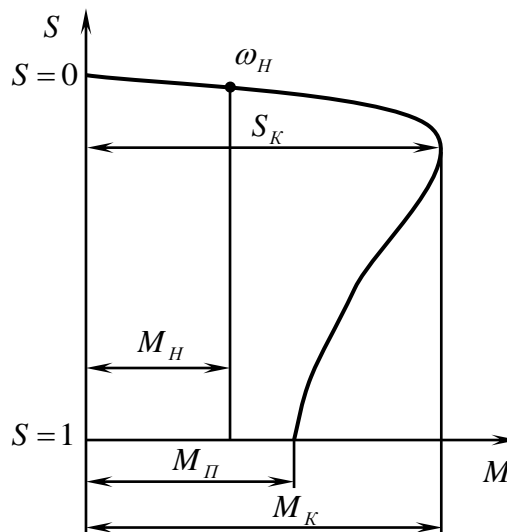


Рисунок 2.38 – Механическая характеристика АД

$$k_M = \frac{1,5}{\omega_c \left( r_1 \pm \sqrt{r_2^2 + x_1^2} \right)}.$$

Постоянная времени двигателя:

$$T_d = \frac{S_k \omega_c J}{2k_M U_\phi^2}, \quad S_k = \pm \frac{r_2'}{\sqrt{r_1^2 + x_L^2}}.$$

*Двигатели постоянного тока (ДПТ)*

ДПТ могут быть представлены как:

а) колебательное звено:

$$W(p) = \frac{k_d}{T_\Theta T_M p^2 + T_M p + 1},$$



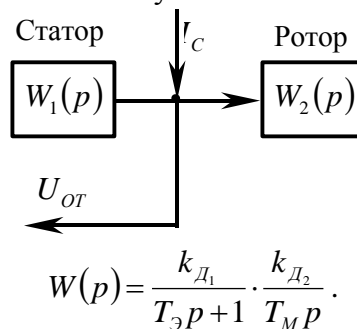
где  $k_D$  — это величина, обратная  $k\Phi$ ;  $k_D = \frac{1}{k\Phi}$ ;  $T_{\Sigma} = \frac{L_{яц}}{R_{яц}}$  — механическая постоянная, учитывает инерционность нарастания магнитных потоков в цепи возбуждения;  $T_M = I \frac{R_{яц}}{(k\Phi)^2}$  — механическая постоянная, учитывающая инерционность механических частей;  $R_{яц}$  — сопротивление якорной цепи;  $J$  — момент инерции электродвигателя;  $L_{яц}$  — индуктивность якорной цепи;

б) инерционное звено второго порядка:

$$W(p) = \frac{k_{\delta}}{(T_1 p + 1)(T_2 p + 1)},$$

где  $(T_1 p + 1) = T_{\Sigma}$ ;  $(T_2 p + 1) = T_M$ ;

в) ДПТ с обратной связью по току:



$T_M = I \frac{R_{я}}{(k\Phi)^2}$ ;  $T_{ТП} = T_{\mu}$  — малая некомпенсируемая постоянная (относится к ТП, а не к ДПТ — не путать с  $T_M$ !).

$$k_{Д1} k_{Д2} = k_D = \frac{1}{k\Phi}; \quad k_{Д2} = \frac{1}{R_{я}}; \quad k_{Д1} = k_D R_{я};$$

г) ДПТ с выходным параметром в виде угла поворота:

$$W(p) = W_K(p) \cdot W_{II}(p) = \frac{k_D}{p(T_{\Sigma} T_M p^2 + T_M p + 1)},$$

где  $W_K(p)$  — передаточная функция колебательного звена;  $W_{II}(p)$  — передаточная функция интегрирующего звена.

Влияние порядка астатизма системы регулирования скорости на вид переходного процесса в АЭП, включая двигатель, может быть охарактеризовано, как показано на рис. 2.39 и рис. 2.40.

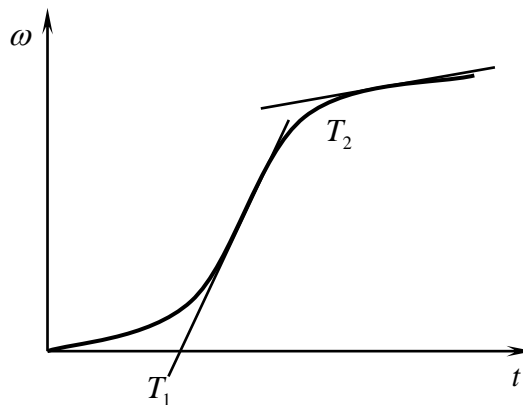


Рисунок 2.39 — Характеристика системы с двухкратным интегрированием

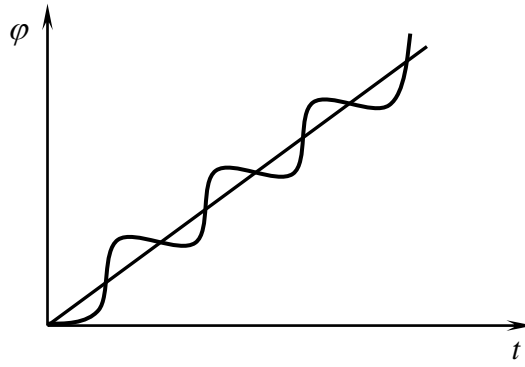


Рисунок 2.40 – Характеристика системы с трехкратным интегрированием

### 13 Редуктор.

Выходной параметр — угловая скорость  $\omega$ :

$$W(p) = k_p; \quad k_p = \frac{1}{u}, \text{ где } u \text{ — передаточное отношение.}$$

Выходной параметр — угол поворота:

$$W(p) = \frac{k_p}{p} = \frac{1}{Tp}.$$

Составление передаточных функций двигателя постоянного тока

В основу положено использование:

– уравнения электрического баланса:

$$U_c = IR_{\text{я}} + k\Phi\omega + L \frac{di}{dt};$$

– уравнение момента:

$$M_{\text{вп}} = k\Phi I = M_c + J \frac{d\omega}{dt},$$

$$W(p) = \frac{k_d}{T_{\text{э}}T_M p^2 + T_M p + 1}.$$

Произведем исследование характеристического уравнения:

$$T_M T_{\text{э}} p^2 + T_M p + 1 = 0,$$

$$p_1 = ?; \quad p_2 = ?$$

Исследования проводятся с целью:

- 1 Установить, устойчива или неустойчива система.
- 2 Установить в каких пределах должны изменяться постоянные времени, чтобы получить соответствующий переходный процесс.

Для этого преобразуем характеристическое уравнение к приведенному виду:

$$T_{\text{э}}T_M p^2 + T_M p + 1 = 0.$$

Левую и правую части полученного уравнения делим на  $T_{\text{э}}T_M$ :

$$p^2 + \frac{p}{T_{\text{э}}} + \frac{1}{T_{\text{э}}T_M} = 0,$$

$$p_1, p_2 = \frac{-1}{2T_{\text{э}}} \pm \sqrt{\left(\frac{1}{2T_{\text{э}}}\right)^2 - \frac{1}{T_{\text{э}}T_M}}.$$

Исследуем дискриминант:

$$\sqrt{\frac{1}{4T_{\text{э}}^2} - \frac{1}{T_{\text{э}}T_M}} = \sqrt{\frac{1}{T_{\text{э}}}\left(\frac{1}{4T_{\text{э}}} - \frac{1}{T_M}\right)}.$$

$$\left. 1 \frac{1}{4T_{\text{э}}} > \frac{1}{T_M} \right\} -\alpha; \quad \text{корень вещественный } p_1.$$

$T_M \geq 4T_{\text{э}}$  — условие существования вещественных корней.

Переходной процесс экспоненциальный; САУ ЭП устойчива.

$$\left. 2 \frac{1}{4T_{\text{э}}} < \frac{1}{T_M} \right\} -\alpha \pm j\beta; \quad \text{корень комплексный } p_2$$

$T_M < 4T_{\text{э}}$  — переходной процесс колебательный.

**Вывод.** Если  $T_M \geq T_{\text{э}}$ , то корни получаются вещественными, и переходной процесс имеет вид экспоненты. При уменьшении механической постоянной  $T_M < 4T_{\text{э}}$  корни комплексные, и переходной процесс — колебательный.

## 2.4 Методика построения переходных процессов на основе использования структурной схемы САУ ЭП

Этапы построения переходных процессов:

- 1 Составляется структурная схема САУ ЭП для подчиненного регулирования (рис. 2.41).

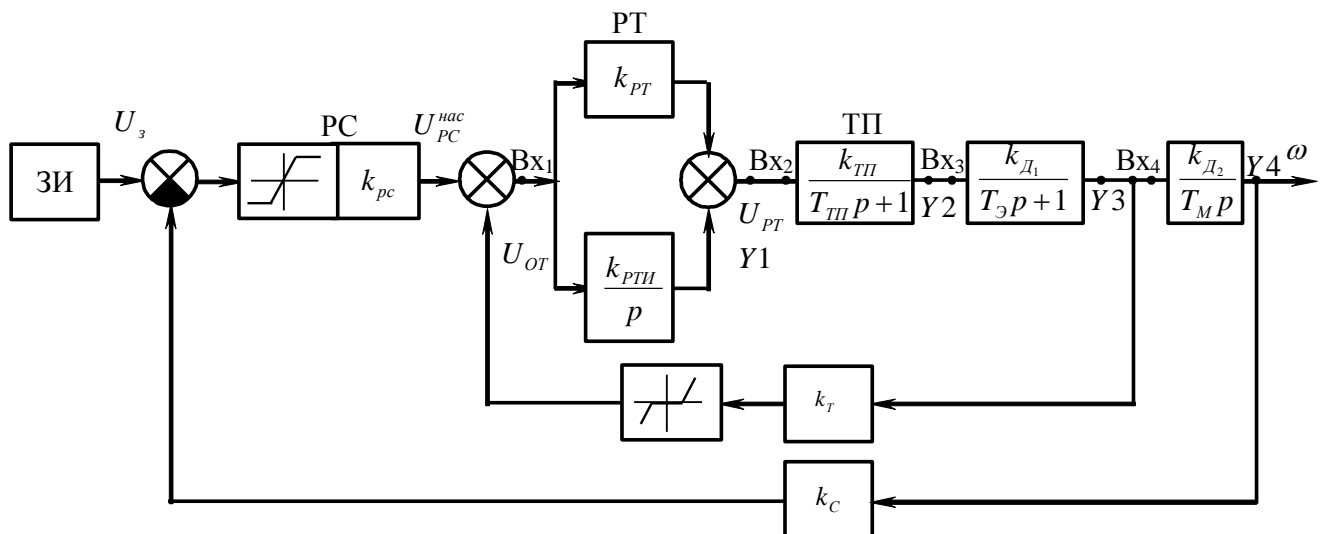


Рисунок 2.41 – Структурная схема двухконтурной САУ ЭП

- 2 Выделяются и нумеруются динамические звенья системы, в передаточных функциях которых содержатся операторы дифференцирования  $p$  (или комплексные числа).
- 3 Нумеруются входные и выходные сигналы каждого звена.
- 4 Нумеруются коэффициенты и постоянные времени, в соответствии с номером звена.
- 5 Используются передаточные функции звеньев для составления дифференциальных уравнений в форме уравнений Коши:

$\Delta y = f(k, T)$  — обычное дифференциальное уравнение;

$$\frac{dy}{dt} = f(k, T) \text{ — дифференциальное уравнение в форме уравнений Коши.}$$

Дифференциальное уравнение в форме уравнений Коши предполагает нахождение производной регулируемого параметра.

- 6 Составляются алгебраические уравнения связи для каждого из входных сигналов.
- 7 Составляется таблица исходных данных для машинной обработки дифференциальных уравнений в форме уравнений Коши и уравнений связи с целью графического представления этих решений (кривые переходных процессов для силы тока и для скорости  $i(t)$ ,  $\omega(t)$ ).
- 8 Используется стандартная программа (старое название: РЭП, СЭП; новое название priv3.exe (аналоговая система)).

*Пример.*

1, 2, 3 и 4-е пункты (рис. 2.42).

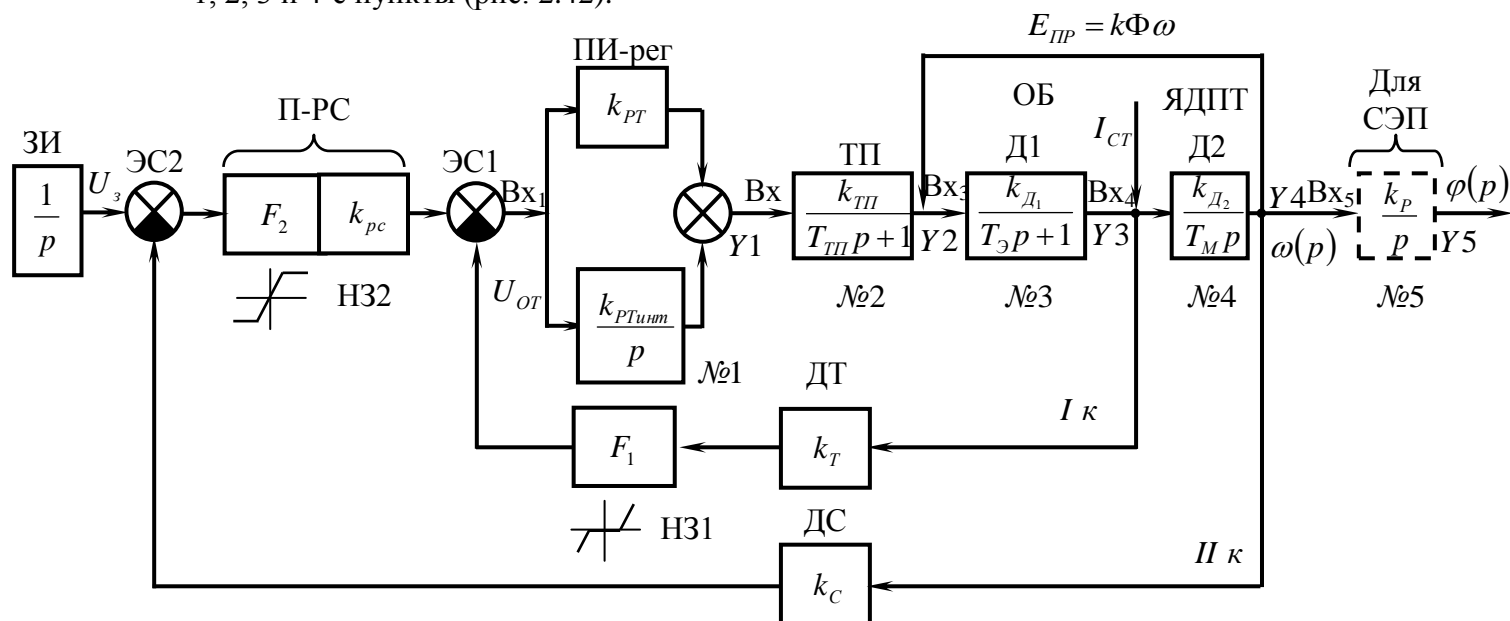


Рисунок 2.42 – Структурная схема САУ ЭП для подчиненного регулирования

$$5 \quad W(p) = \frac{\Delta Y_1(p)}{Bx_1(p)} = \frac{k_{PTI_{um}}}{p}.$$

Находим  $\Delta y_1(p)$ :

$$\Delta Y_1(p) = \frac{k_{PTIHT} B x_1(p)}{p},$$

$$\begin{aligned}\Delta Y_1(p)p &= Y_1(p)p = k_{PTI_{lum}} Bx_1(p), \\ Y_1p &= Y_1',\end{aligned}$$

где  $p$  — оператор дифференцирования.

$$p = \frac{d}{dt}; \quad y_1 p = y_1' = k_{\text{ПТИНТ}} B_{X1}.$$

Дифференциальные уравнения Коши:

$$y_1 p = y_1' = k_{PTI_{lim}} B x_1,$$

$$Y_2 p = \frac{k_{TII} B x_2 - Y_2}{T_{\mu}},$$

$$Y_3 p = Y_3' = \frac{k_{д1} B_{x3} - Y_3}{T_{д1}},$$

$$Y_4 p = \frac{k_{д2} \cdot Bx_4}{T_M} = Y_4'.$$

Уравнения связей:

$$Bx_1 = (U_3 - U_{OC})k_{PC} - (I_{д}k_T - U_{CP1}),$$

$$Bx_2 = Y_1 + Bx_1 k_{PT},$$

$$Bx_3 = Y_2 - k\Phi\omega = Y_2 - E_{ПП},$$

$$Bx_4 = Y_3 + I_{CT}.$$

Параллельно определяем входы по пункту 6.

$$(U_3 - U_{OC})k_{PC} - U_{OT} = Bx_1,$$

где  $(U_3 - U_{OC})k_{PC} = U_{PC}$ .

$$U_{OT} = I_{д}k_T - U_{CP1}.$$

$$Bx_1 = (U_3 - U_{OC})k_{PC} - (I_{д}k_T - U_{CP1}),$$

$$Bx_1 = (U_3 - U_{OC})k_{PC} - (I_{д}k_T - F_1).$$

Перейдем по второму звену ТП.

Составляем уравнение Коши для тиристорного преобразователя (звено № 2 (ТП)):

$$W_{ТП}(p) = \frac{k_{ТП}}{T_{\mu}p + 1} = \frac{Y_2}{Bx_2};$$

$$T_{ТП} = T_{\mu};$$

$$Y_2 = \frac{k_{ТП} Bx_2}{T_{\mu}p + 1},$$

$$Y_2(T_{\mu}p + 1) = k_{ТП} Bx_2,$$

$$Y_2 T_{\mu}p + Y_2 = k_{ТП} Bx_2,$$

$$Y_2 p = \frac{k_{ТП} Bx_2 - Y_2}{T_{\mu}};$$

Составим уравнение связей для  $Bx_2$ :

$$Bx_2 = Y_1 + Bx_1 \cdot k_{PT}.$$

Перейдем к третьему звену:

$$W_{д1}(p) = \frac{k_{д1}}{T_{\vartheta}p + 1} = \frac{Y_3}{Bx_3};$$

$$Y_3 = \frac{k_{д1} Bx_3}{T_{\vartheta}p + 1},$$

$$Y_3 p = \frac{k_{д1} Bx_3 - Y_3}{T_{\vartheta}}.$$

Составим уравнение связей для этого звена:

$$Bx_3 = Y_2 - k\Phi\omega.$$

Проанализируем звено № 4 (Д2):

$$W_{д2}(p) = \frac{k_{д2}}{T_M p} = \frac{Y_4}{Bx_4},$$

$$\frac{Bx_4 k_{Д2}}{T_M p} = Y_4,$$

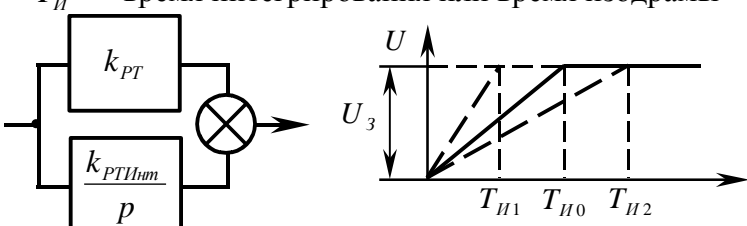
$$pY_4 = \frac{Bx_4 \cdot k_{Д2}}{T_M}.$$

Составим уравнение связи для  $Bx_4$ :

$$Bx_4 = Y_3 + I_{CT}.$$

Для совместного решения полученных уравнений связей и дифференциальных уравнений в форме уравнений Коши привлекаем стандартную программу (табл. 2.2).

**Таблица 2.2 – Исходные данные**

Этап	Параметр	Единица измерения	Идентификация	Примечания
1	2	3	4	5
1	$t_{III}$	с	$T$	Ожидаемое время переходного процесса $t_{III} = (3...4)T_M$
2	$k_{PC}$	—	$k_{PC}$	Коэффициент передачи регулятора скорости
3	$k_{PT}$	—	$k_{PT}$	Коэффициент передачи РТ — пропорциональной части
4	$k_{PTInt}$	—	$k_{PTInt}$	<p>Коэффициент передачи РТ — интегральной части</p> <p>1) <math>k_{PTInt} = \frac{1}{T_I}, T_I = k_{PC} \cdot 2T_\mu,</math></p> <p><math>T_I</math> — время интегрирования или время изодрамы</p>  <p>2) <math>k_{PTInt} = \frac{1}{k_{PT} k_{ТП} k_{Д} k_T \cdot 2T_\mu};</math></p> <p>3) <math>k_{PTInt} = \frac{R_{ЯЦ}}{k_{ТП} k_T \cdot 2T_\mu},</math></p> <p>где <math>k_T</math> — коэффициент передачи обратной связи по току</p>
5	$k_{ТП}$	—	$КТП$	Коэффициент передачи тиристорного преобразователя
6	$T_{ТП}$	с	$ТТП$	<p>Постоянная времени тиристорного преобразователя</p> <p><math>T_{ТП} = T_\mu = T_\alpha,</math></p> <p>где <math>T_\alpha</math> — постоянная времени апериодического звена</p> <p><math>T_\mu = 0,01 \div 0,005</math> с</p>
7	$k_{Д1}$	В/рад	$КД1$	<p>Коэффициент передачи первой части двигателя:</p> <p><math>k_{Д1} = \frac{1}{R_{ЯЦ}}</math></p>
8	$k_{Д2}$	В/рад	$КД2$	<p>Коэффициент передачи второй части двигателя (якоря):</p> <p><math>k_{Д2} = k_D R_{ЯЦ},</math></p> <p>где <math>k_D = \frac{1}{k\Phi}</math></p>

1	2	3	4	5
9	$T_{\Sigma} = T_{\Sigma} =$ $= \frac{L_{\Sigma}}{R_{\Sigma}}$	с	$T_{\Sigma}$	Электромагнитная постоянная
10	$k\Phi_H$		С	Определяется из уравнения статической естественной характеристики
11	$k_T$	В/А	$KT$	Коэффициент обратной связи по току
12	$k_C$	В/с	$KC$	Коэффициент обратной связи по скорости
1	2	3	4	5
13	$U_3$	В	$U_3$	Напряжение задания $\leq 15$ В
14	$I_C$	А	$I_C$	Статическая нагрузка по току $I_C = (0,1 \div 0,15)I_H$ при запуске привода. При запуске станка $I_C = 15\% I_H$ . При подведении резца $I_C = I_H$
15	$U_{CP1}$ $U_{CP2}$	В	$H31$ $H32$ или $UCP1$ $UCP2$	Напряжение сравнения в нелинейных звеньях (в контуре тока и контуре скорости)
16	$Y1$ $Y2$ $Y3$ $Y4$	В В А рад/с	$Y1$ $ETП$ $I$ $Y4$	Входные параметры соответствующих звеньев: $Y1 = U_{PT}$ ; $Y2 \Rightarrow$ ЭДС тиристорного преобразователя; $Y3 \Rightarrow$ сила тока; $Y4 \Rightarrow$ угловая скорость (в начальный момент равна нулю)

Расчеты производятся по приведенным исходным данным с использованием программы РЭП-СЭП или `priv 3.exe`.

Расчет производится в 4 фазы:

- 1 Пуск холостую при  $I_{CT} = 0,1 \dots 0,15 I_H$ .  
При этом  $Y_1, Y_2, Y_3, Y_4$  назначаются равными нулю.
- 2 Наброс нагрузки:  
 $I_{CT} = I_H, Y_1, Y_2, Y_3, Y_4$  переносятся из первой фазы расчета.
- 3 Снятие нагрузки (отводим резец от детали).  
 $I_{CT} = 0,1 \div 0,15 I_H; Y_1, Y_2, Y_3, Y_4$  — переносятся из фазы расчета «наброс нагрузки».
- 4 Торможение.  
Под нагрузкой или под холостым ходом.

Результат работы программы по расчету переходных процессов представлен на рис. 2.43, а для анализа действия нагрузки в статике представлен рис. 2.44.

Из статической характеристики (рис. 2.44) видно, что  $\sigma_{CT}$  по переходному процессу меньше либо равна  $\sigma_{CT}$ .

Значения силы тока по статической характеристике и по переходному процессу должны быть соизмеримы.

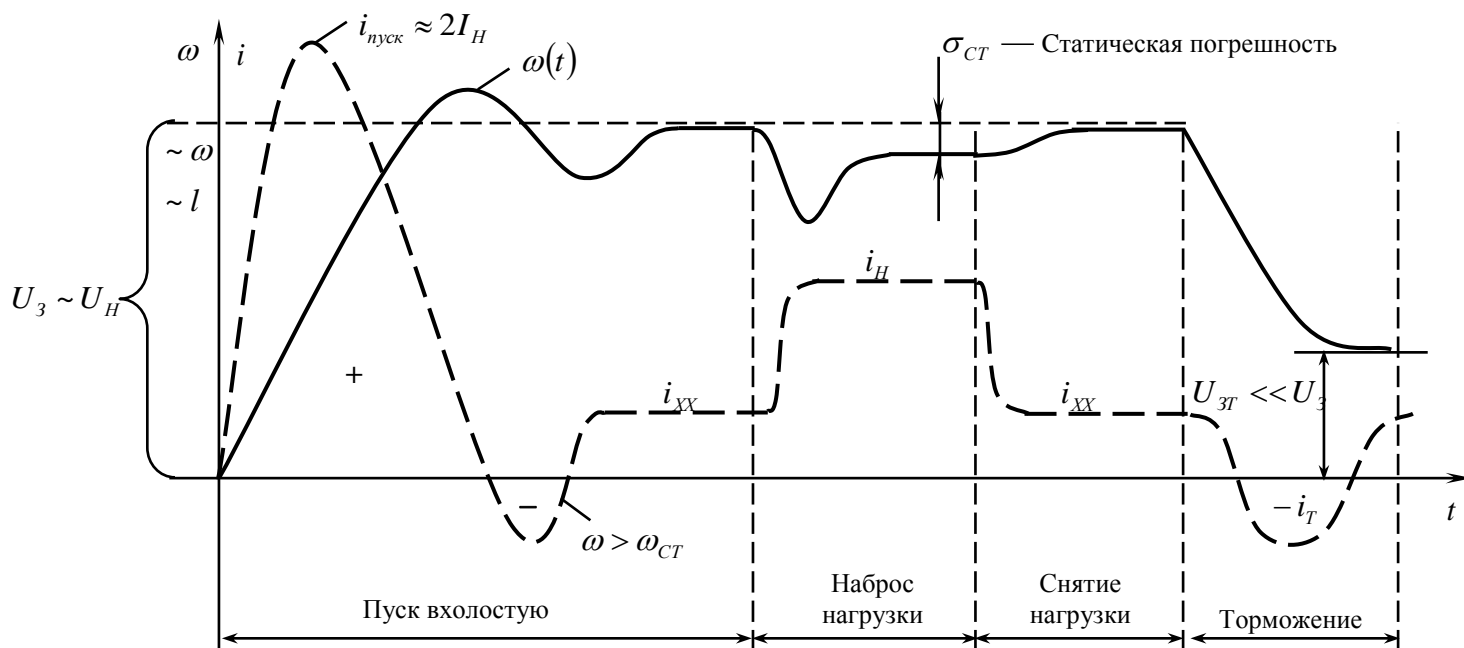


Рисунок 2.43 – Результат работы программы по расчету переходных процессов

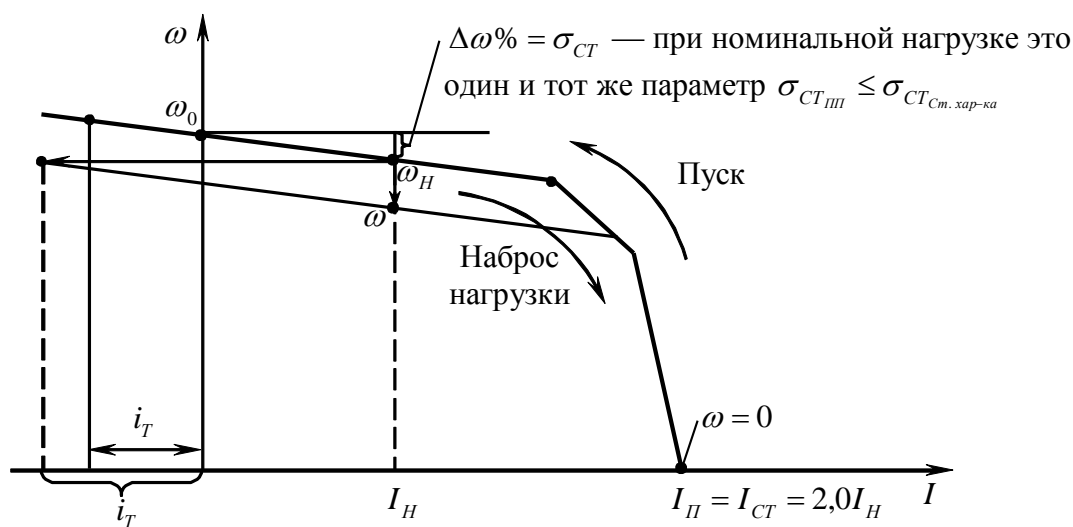


Рисунок 2.44 – Анализ действия нагрузки в статике

## 2.5 Синтез САУ ЭП

Под *синтезом* понимают целенаправленный расчет системы управления приводом или ее элементов с целью получения оптимальных значений регулируемых параметров (оптимальный — наилучший для данных параметров).

В качестве оптимальных параметров для САУ ЭП принимают, как правило, следующие условия:



- минимальную статическую погрешность  $\sigma_{CT_{\min}} \leq (5...10)\%$  ;
- $t_{III}$  должно стремиться к минимуму, быстродействие должно быть максимальным;  
 $t_{III} \rightarrow \min$  ;
- абсолютную устойчивость.

### 2.5.1 Методика оптимизации

Оптимизация основана на использовании желаемых передаточных функций, последовательной коррекции.

$$W_{\mathcal{K}}(p);$$

$$W_{\mathcal{K}}(p) = W_{ИЗМ}(p) \cdot W_H(p).$$

В связи с этим реальная передаточная функция системы определяется произведением величины неизменяемой части на передаточную функцию изменяемой части системы. Для того чтобы передаточная функция реальной системы равнялась желаемой, необходимо оперировать изменяемой частью, в качестве которой выступает регулятор с изменяемыми параметрами и структурой.

Тогда для определения структуры и параметров регулятора, в соответствии с теорией последовательной коррекции, необходимо желаемую ПФ разделить на ПФ неизменяемой части:

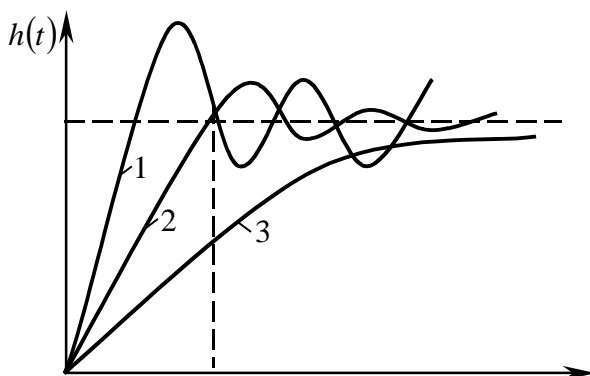
$$W_P(p) = W_{\mathcal{K}}(p),$$

$$W_{ИЗМ}(p) = W_P(p) = \frac{W_{\mathcal{K}}(p)}{W_H(p)}.$$

Неизменяемая часть определяется передаточной функцией тиристорного преобразователя и двигателя.

Оптимальные параметры регулирования САУ ЭП оцениваются следующим образом:

1 Выбирается соответствующий вид переходного процесса (рис. 2.45).



1 — колебательный переходной процесс  $\alpha = 1$ ;  $\xi = 0,5$ ;  $\sigma \gg 5\%$ .

2 — апериодический переходной процесс  $\alpha = 2$ ;  $\xi = 0,707$ ;  $\sigma = 5\%$ .

3 — экспоненциальный переходной процесс  $\alpha = 4$ ;  $\xi = 1$ ;  $\sigma \rightarrow 0$

Рисунок 2.45 – Виды переходного процесса в САУ ЭП

Структурная схема двухконтурной САУ ЭП (для регулируемого привода) представлена на рис. 2.46.

В такой системе необходимо:

- определить  $W_{PT}(p)$ ;
- определить  $W_{PC}(p)$ ;

- определить передаточную функцию изменяемой части в первом контуре:

$$W_{ИЗМ_I}(p) = W_{PT}(p) - в I \text{ к};$$

- найти передаточную функцию изменяемой части во втором контуре:

$$W_{ИЗМ_{II}}(p) = W_{PC}(p) - во II \text{ к}.$$

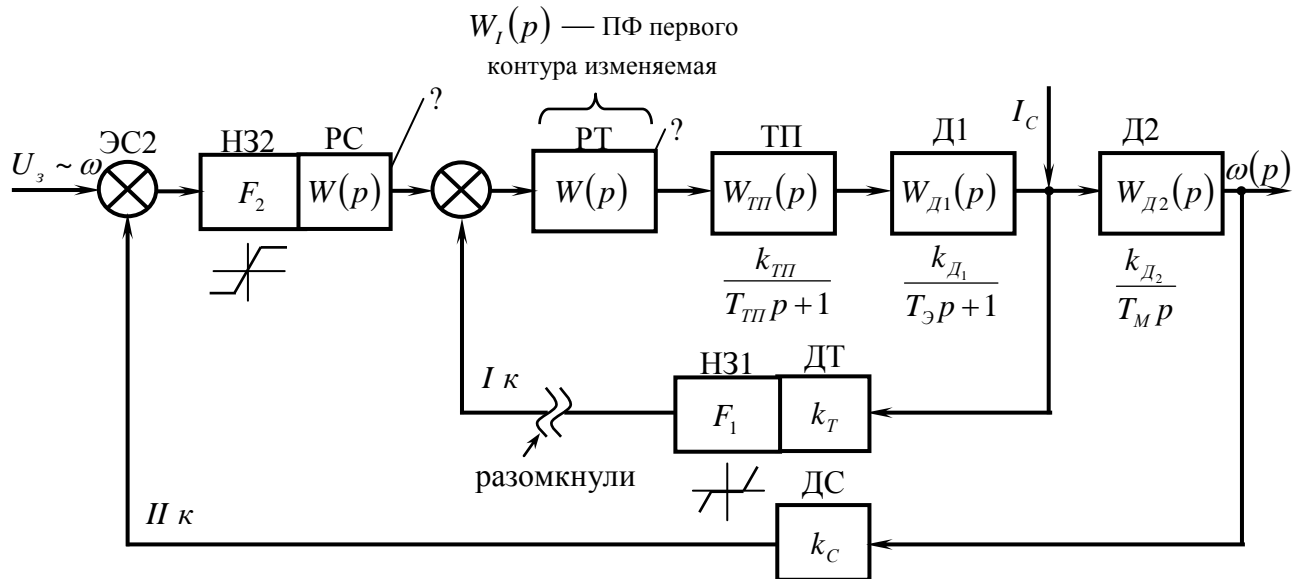


Рисунок 2.46 – Структурная схема регулируемого привода

$$W_{PT. K3}(p) = \frac{W_{Ж}(p)}{W_{Неизм}(p)} = W_{Изм}(p).$$

Для решения задачи синтеза определяют выражения желаемых передаточных функций для первого и второго контура.

Для этого используют следующие подходы:

- технический оптимум (модульный принцип), который обеспечивает  $t_{III} \rightarrow \min$ , статическую погрешность  $\sigma = (5...10)\%$  и абсолютную устойчивость;
- симметричный оптимум, который обеспечивает погрешность, стремящуюся к нулю,  $\sigma \rightarrow 0$ ; эти установки называются прецизионными.

Желаемая передаточная функция  $W_{Ж}(p)$  состоит из двух идеальных звеньев: интегрирующего и аperiодического:

$$W_{Ж}(p) = W_H(p)W_{An}(p) = \frac{k_H}{T_H p} \frac{k_\alpha}{T_\alpha p + 1}.$$

Как указано выше, отношение  $T_H/T_\alpha$  определяет вид переходного процесса:

- $\alpha = 1$  — колебательный переходной процесс;
- $\alpha = 2$  — аperiодический переходной процесс;
- $\alpha = 4$  — экспоненциальный переходной процесс.

Тогда запишем и второе допущение:

$$k_H = k_\alpha = 1.$$

Для аperiодического звена:

$$W_{Ж Anep}(p) = \frac{1}{2T_\alpha p} \frac{1}{T_\alpha p + 1}.$$

Разновидности желаемых передаточных функций для различного вида переходных процессов, а также для внутреннего и внешнего контуров представлены в табл. 2.3.

**Таблица 2.3 - Разновидности желаемых передаточных функций для различного вида переходных процессов**

Вид переходного процесса	$\alpha$	$\xi$	$I \kappa$	$II \kappa$
1 Экспоненциальный	4	1	$\frac{1}{4T_{\alpha}p(T_{\alpha}p+1)}$	$\frac{1}{8T_{\mu}p(2T_{\mu}p+1)}$
2 Аперриодический	2	0,707	$\frac{1}{2T_{\alpha}p(T_{\alpha}p+1)}$	$\frac{1}{4T_{\mu}p(2T_{\mu}p+1)}$
3 Колебательный	1	< 0,5	$\frac{1}{T_{\alpha}p(T_{\alpha}p+1)}$	$\frac{1}{2T_{\mu}p(2T_{\mu}p+1)}$

$T_{\alpha} = T_{\mu} = T_{\text{ТП}}$  в пределах от одной сотой до пяти тысячных — малая некомпенсируемая постоянная. Частота сопряжения  $f_c = \frac{1}{T}$ .

*Примечание.* Во внешних контурах или при переходе ко внешним контурам постоянные времени интегрирующего и аперриодического звеньев увеличиваются в 2 раза с целью смещения ЛАЧХ внешних контуров в область низких частот (рис. 2.47 и рис. 2.48).

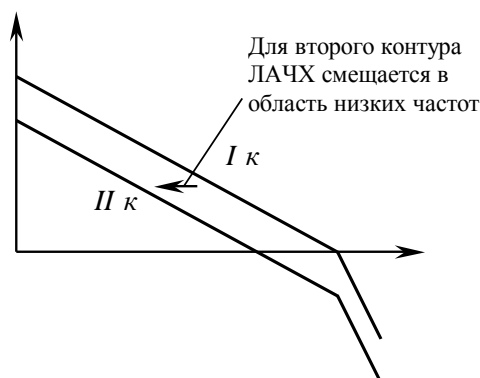
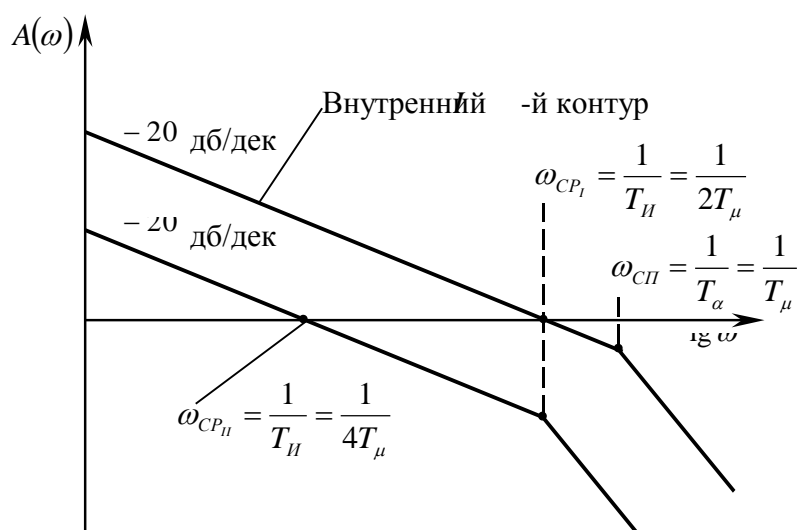


Рисунок 2.47 – Поведение ЛАЧХ при переходе ко второму контуру



$\omega_{CP}$  — частота среза;  $\omega_{СП}$  — частота сопряжения.

Рисунок 2.48 – ЛАЧХ для двухконтурной системы

Если система оптимизируется по техническому оптимуму, то в системе до точки приложения нагрузки появляется одно интегрирующее звено, то есть искомый регулятор тока является ПИ-регулятором. Такие системы называются *астатическими* или *системами с однократным интегрированием*. Если необходимо увеличить точность регулирования, то применяют системы астатические второго порядка или с двукратным интегрированием. Тогда и в первом и во втором контурах образуются регуляторы типа ПИ. Таким образом, в системе начинают действовать два интегрирующих звена.

Выходной сигнал будет в противофазе со входным при сдвиге фаз  $180^\circ$ , и система абсолютно неустойчивая (рис. 2.49).

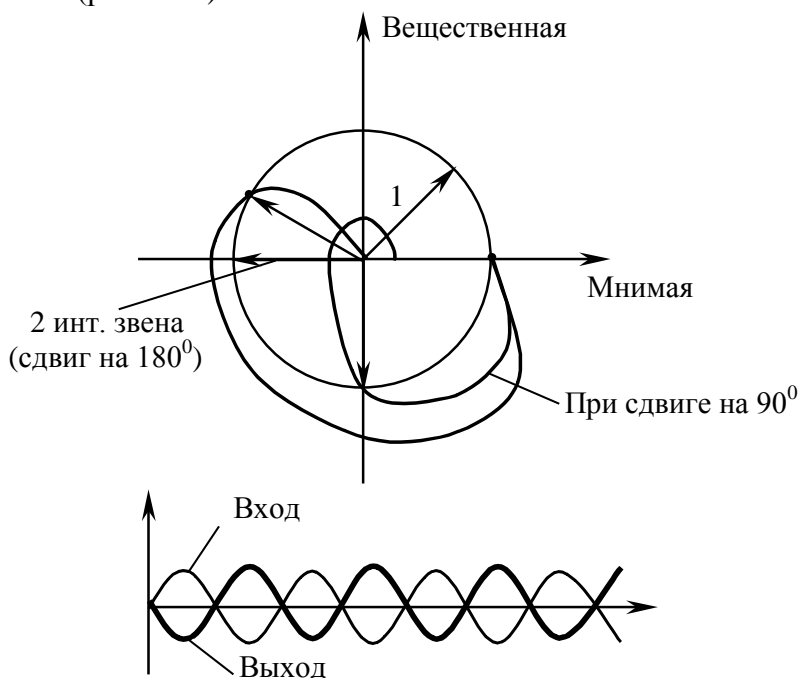


Рисунок 2.49 – ФЧХ системы с двукратным интегрированием

Для обеспечения устойчивости необходимо деформировать исходную ЛАЧХ путем ввода в систему форсирующего или дифференцирующего звена (создают сдвиг фаз — опережение) рис. 2.50.

При этом ЛАЧХ желаемой передаточной функции этой системы примет симметричный вид по отношению к оси частот. Этот метод получил название *симметричный оптимум*.

#### Методика оптимизации:

- 1 Составляется структурная схема двухконтурной САУ. ЭП.
- 2 На схеме выделяются изменяемые и неизменяемые части. Изменяемая часть представлена регуляторами, структура которых может меняться. Неизменяемые части представлены реальными звеньями системы.
- 3 Выбирается вид желаемого оптимального переходного процесса:
  - для регулируемого привода — апериодический переходный процесс;
  - для следящего электропривода — монотонный (экспоненциальный переходный процесс).
- 4 Выбирают вид желаемой передаточной функции по виду переходного процесса и по виду привода.
- 5 Оптимизацию начинают с внутреннего контура в соответствии с принципом последовательной коррекции.

6 В результате преобразований получают передаточную функцию изменяемой части, в качестве которой выступают регуляторы:

- во внутреннем контуре – регулятор тока (как правило ПИ регулятор);
- во внешнем контуре – регулятор скорости (как правило, типа П – регулятора).

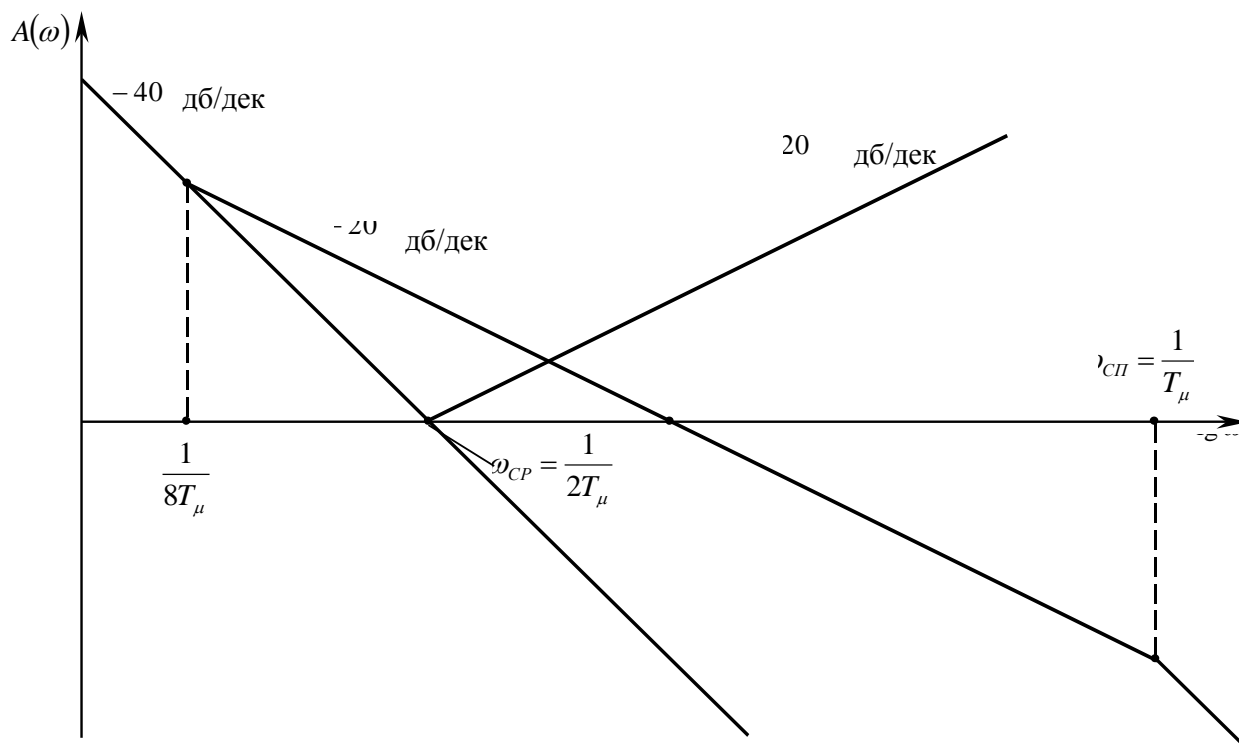


Рисунок 2.50 – ЛАЧХ астатической системы второго порядка

Оптимизация внутреннего контура ( I к ) (синтез регулятора тока):

$$W_{Ж I PA3}(p) = W_{PA3 PI}(p) = W_{PT}(p) \cdot W_{ТП}(p) \cdot W_{Д1}(p) \cdot W_{ДТ}(p),$$

где  $W_{PT}(p)$  — неизвестная передаточная функция регулятора тока;

$W_{Ж I PA3}(p)$  — желаемая передаточная функция первого контура, разомкнутого;

$W_{PA3 PI}(p)$  — передаточная функция, состоящая из реальных звеньев в разомкнутой системе;

$W_{ДТ}(p)$  — передаточная функция датчика тока.

Исходя из принципа последовательной коррекции, находим передаточную функцию регулятора тока (изменяемая часть):

$$W_{ИЗМ.ч}(p) = W_{PT}(p) = \frac{W_{Ж}(p)}{W_{ТП}(p)W_{Д1}(p)W_{ДТ}(p)}.$$

Надо найти передаточную функцию для апериодического процесса (желаемую):

$$W_{ИЗМ.ч}(p) = \frac{1}{\frac{2T_{\mu}p(T_{\mu}p+1)}{k_{ТП} \frac{k_{Д1}}{T_{\mu}p+1} k_{ДТ}}},$$

где  $k_{дт} = 1$ ,  $T_{\alpha} = T_{\mu} = T_{ТП} = 0,01 \dots 0,005$ ;  $T_{я} = T_{\mathfrak{C}} = \frac{L_{я}}{R_{я}}$ .

Принимаем  $k_{дт} = 1$  или  $k_T = k_{дт}$  — одно и то же.

$$W_{изм.ч}(p) = \frac{T_{\mathfrak{C}}p + 1}{2T_{\mu}pk_{ТП}k_{д1}} = \frac{T_1p + 1}{T_2p},$$

где  $\frac{T_1p + 1}{T_2p}$  — ПИ-регулятор.

Пусть  $T_{\mathfrak{C}} = T_1$ , а  $2T_{\mu}pk_{ТП}k_{д1} = T_2$ . Тогда  $W_{изм.ч}(p) = k_T \Delta x + k_{ТИ} \int_{T_1}^{T_2} \Delta x dt$ ,

где  $k_T \Delta x$  представляет пропорциональную часть (П), а  $k_{ТИ} \int_{T_1}^{T_2} \Delta x dt$  — интегрирующую (И).

Таким образом, регулятор тока — это ПИ-регулятор, который расположен до точки приложения нагрузки. Первый контур реализован на астатической системе первого порядка (с однократным интегрированием).

### 2.5.2 Оптимизация внешнего контура — контура скорости (синтез регулятора скорости)

Передаточную функцию замкнутого первого контура  $W_{I\kappa\mathfrak{C}}$  (рис. 2.51) находим по известным правилам для нахождения передаточных функций замкнутых систем. В числителе — передаточная функция прямой цепи, а в знаменателе — сумма единицы и произведения передаточной функции обратной связи и передаточной функции разомкнутой системы.

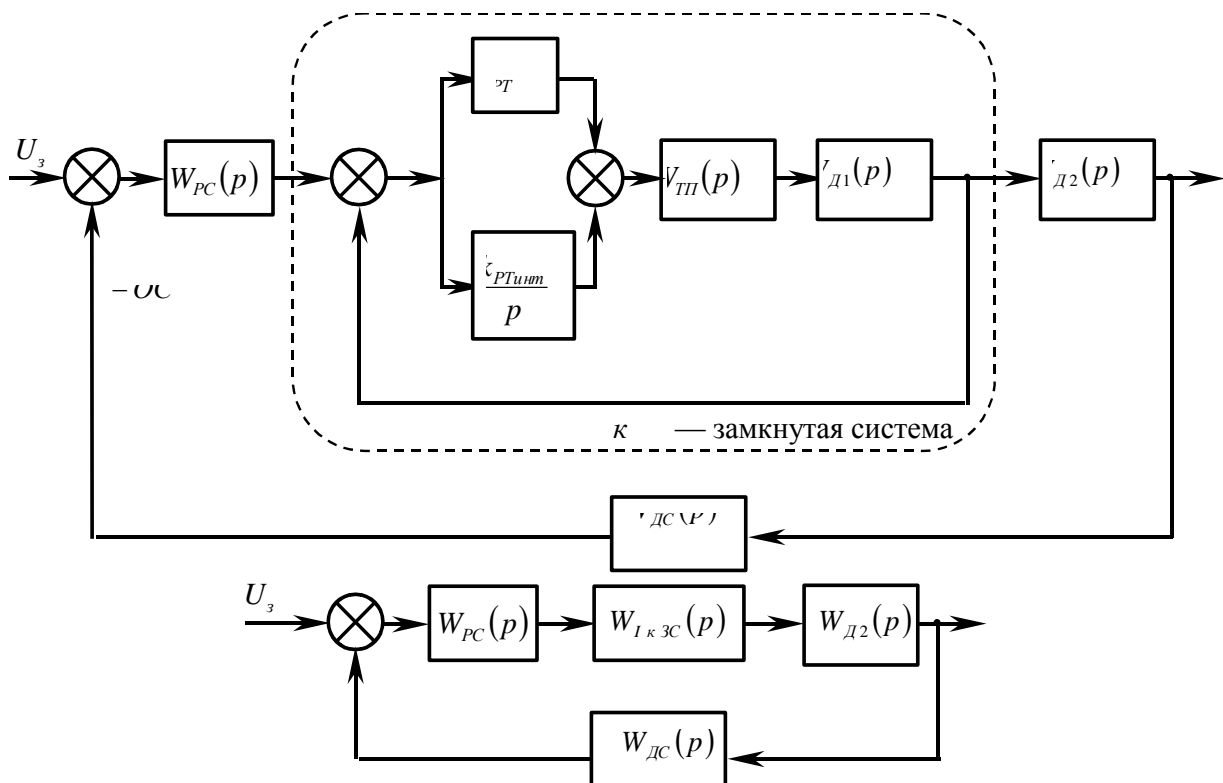
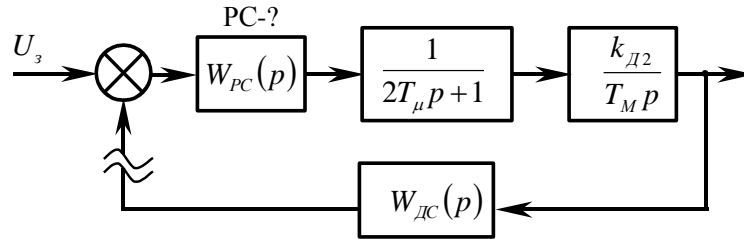


Рисунок 2.51 – Структурная схема контура скорости

$$W_{IK3}(p) = \frac{W_{ЖI}(p)}{1 + W_{ЖI}(p)W_{ДГ}(p)},$$

$$W_{IK3}(p) = \frac{1}{1 + \frac{1}{2T_{\mu}p(T_{\mu}p+1)}} = \frac{1}{2T_{\mu}p(T_{\mu}p+1)+1} = \frac{1}{2T_{\mu}^2p^2 + 2T_{\mu}p + 1} \approx \frac{1}{2T_{\mu}p + 1}.$$

Синтез неизвестной неизменяемой части (регулятора скорости) производим в соответствии с методикой для контура тока.



$$W_{ЖII раз}(p) = W_{P раз}(p) = W_{PC}(p)W_{IK3}(p)W_{Д2}(p)W_{ДС}(p),$$

$$W_{PC}(p) = \frac{W_{ЖII апериодразсис.}(p)}{W_{IK3}(p)W_{Д2}(p)W_{ДС}(p)} = \frac{W_{ЖII апериодразсис.}(p)}{W_{IK3}(p)W_{Д2}(p)1},$$

где  $W_{ДС}(p) = 1$ .

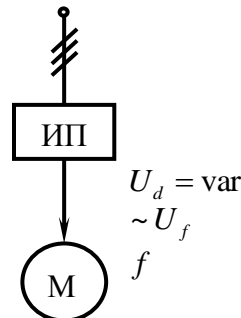
$$W_{PC}(p) = \frac{1}{\frac{4T_{\mu}p(2T_{\mu}p+1)}{1} \frac{k_{Д2}}{2T_{\mu}p+1} \frac{1}{T_M p}} = \frac{T_M p}{4T_{\mu}p k_{Д2}} = \frac{T_1}{T_2} = k',$$

где  $T_{\mu} = T_{ТП}$ ;  $T_M = \frac{JR}{(k\Phi)^2}$ ;  $T_1 = T_M$ ;  $T_2 = 4T_{\mu}k_{Д2}$ .

Таким образом, в процессе синтеза контура скорости мы получили структуру П-регулятора.

### 2.5.3 Особенности и разновидности источников питания САУ ЭП

*Источник питания* — это устройство, которое формирует параметры электроэнергии для питания двигателей различного типа (рис. 2.52).

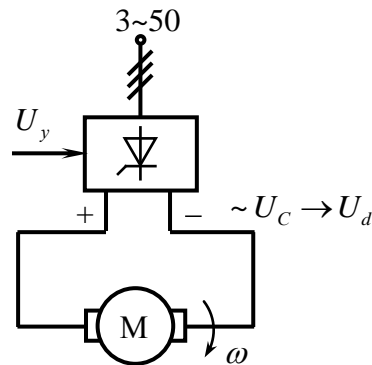


*ИП* — источник питания (преобразователь энергии); *М* — асинхронный двигатель с фазным ротором, двигателя постоянного тока, шаговый двигатель

Рисунок 2.52 – Схема питания двигателя

## 7 Тиристорный преобразователь (ТП).

Система питания ТП-Д может быть упрощенно представлена так, как показано на рис.2.53 , а тиристорный пуск и принцип регулирования скорости напряжением – на рис.2.54.



$$U_d = \text{var}, \quad \omega = f(U_d \text{ var}).$$

Рисунок 2.53 – Система питания ТП-Д

Индекс «d» означает, что напряжение постоянно.

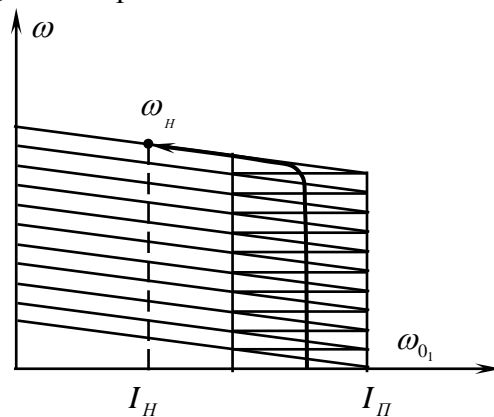


Рисунок 2.54 – Регулирования скорости напряжением

ТП предназначен для преобразования энергии переменного тока в энергию постоянного тока, а также для регулирования выпрямленного напряжения.

## 8 Тиристорный преобразователь частоты (ТПЧ).

Система питания ТПЧ-АД может быть упрощенно представлена так, как показано на рис. 2.55, а механические характеристики асинхронного двигателя при питании от ТПЧ - на рис. 2.56.

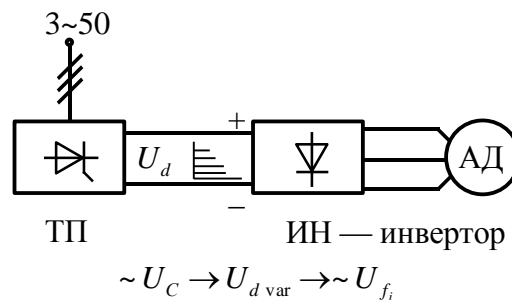


Рисунок 2.55 – Система питания ТПЧ-АД

ТПЧ предназначен для преобразования частоты питающей сети в частоту трехфазного переменного тока, отличную от номинальной.



$f_i$  —  $i$ -я частота;  $f_c < f_i < f_c$  (может быть больше или меньше частоты сети).

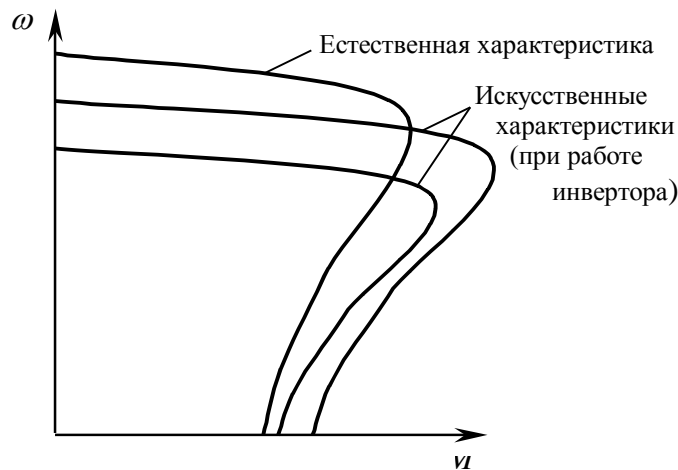


Рисунок 2.56 – Механические характеристики асинхронного двигателя

## 9 Широтно-импульсный преобразователь (ШИП).

ШИП предназначен для питания двигателей постоянного тока и может быть упрощенно представлен так, как показано на рис. 2.57, а регулирование скорости изменением скважности сигнала, поступающего на двигатель - на рис. 2.58.

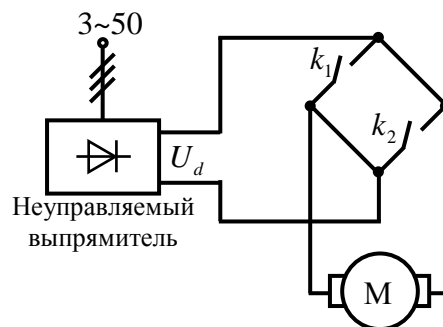


Рисунок 2.57 – Схема ШИП

Также ШИП еще называют ШИМ — широтно-импульсный модулятор.

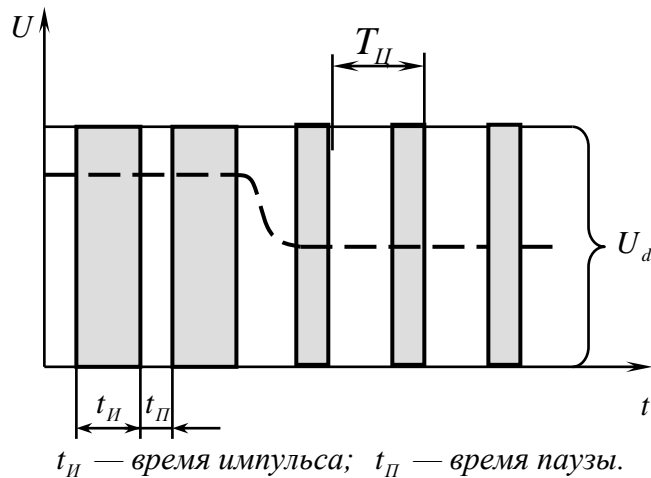


Рисунок 2.58 – Регулирование скорости ДПТ с помощью ШИП

ШИП предназначен для преобразования или выпрямления переменного тока в постоянный и для изменения выходного напряжения за счет изменения так называемой *скважности*:

$$\gamma = \frac{t_H}{t_H + t_{II}} = \frac{t_H}{T_{II}},$$

где  $T_{II} = t_H + t_{II}$  — время цикла.

Изменяется время паузы  $t_{II}$ .

#### 10 Электронный коммутатор для шагового двигателя (ШД).

Управление шаговым двигателем осуществляется с помощью электронного коммутатора фаз (рис. 2.59).

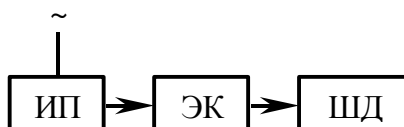


Рисунок 2.59 – Структура системы управления ШД

Характерной особенностью шагового двигателя является дискретное, пошаговое, угловое перемещение (за один шаг ротор шагового двигателя проворачивается на угол  $\alpha = 2...3^\circ$ ).

Магнитное поле вращается по часовой стрелке, а ротор — против часовой стрелки — особенность ШД.

Электронный коммутатор подключается к источнику питания, осуществляя формирование импульсов тока в статоре шагового двигателя за счет последовательного подключения статорных обмоток.

#### 2.5.4 Особенности трехфазных тиристорных преобразователей

В настоящее время получили распространение комплектные тиристорные преобразователи.

Комплектность заключается в содержании следующих компонентов тиристорных преобразователей:

- силового вентильного блока (СВБ) — 3, 6 или 12 тириستоров;
- системы управления тиристорных преобразователей (набор субблоков) СУ ТП;
- системы управления электроприводом СУ ЭП.

Схемы соединения СВБ:

- нулевая (три тиристора)

$$k_{CX} = \frac{U_d}{U_{\text{Л}}} = 0,68;$$

- мостовая (шесть тиристоров)

$$k_{CX} = 1,35.$$

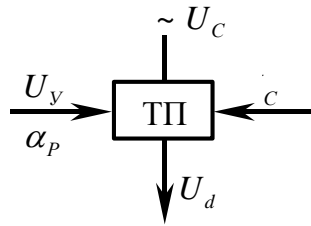
*Коэффициент схемы* — отношение выходного напряжения к линейному (фазному).

Выбор трансформатора: от 220 до 250...260 В.

Для нулевой схемы  $\sim U_C = 220 \text{ В} \Rightarrow \frac{U_d}{220} = 0,68; U_d = U_{\text{Л}} \cdot 0,68 = 148 \text{ В}.$

Для мостовой схемы  $\sim U_C = 220 \text{ В} \Rightarrow \frac{U_d}{220} = 1,35; U_d = U_{\text{Л}} \cdot 1,35 = 297 \text{ В}.$

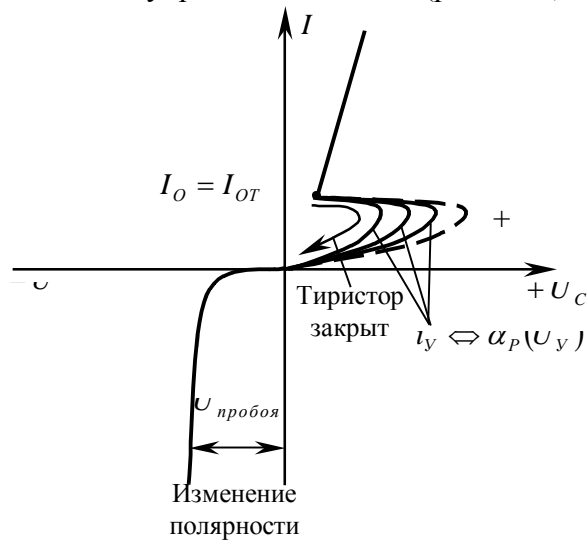
Работа тиристорного преобразователя оценивается рядом характеристик:



*Статические характеристики:*

*а) вольтамперная характеристика.*

Эта характеристика показывает зависимость выпрямленного тока от приложенного к тиристору напряжения и величины управляющего тока (рис. 2.60).



$i_y$  — ток управления;  $I_O$  — ток удержания, при достижении которого характеристика переключается

Рисунок 2.60 – Вольтамперная характеристика

Закреть тиристор можно, изменив полярность напряжения, но нельзя увеличивать напряжение больше, чем  $U_{пр}$ . Схема включения тиристора приведена на рис. 2.61.

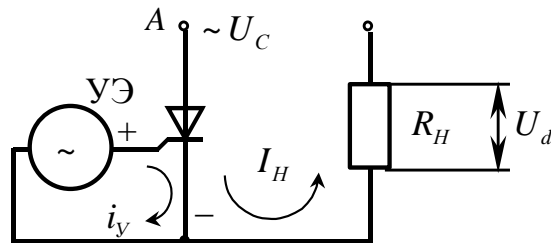


Рисунок 2.61 – Схема включения тиристора

Процесс запираания тиристора осуществляется:

- за счет снижения тока нагрузки  $I_H \leq I_O$ ;
- за счет изменения полярности напряжения;

*б) регулировочные характеристики:*

- $\alpha = f(U_v)$ ;
- $U_d = f(\alpha_p)$  — представляет особый интерес.

Трехфазный тиристорный преобразователь при его наладке требует фазировки, то есть определенной последовательности смены фаз (A, B, C, сдвинутые относительно друг друга на  $120^\circ$ ) рис. 2.62. В однофазных тиристорных преобразователях начало отсчета – с  $0^\circ$ , а для трехфазных – с  $\alpha_H = 30^\circ$ . Особенностью трехфазного тиристорного преобразователя является то, что отсчет угла начинается с  $30^\circ$ .

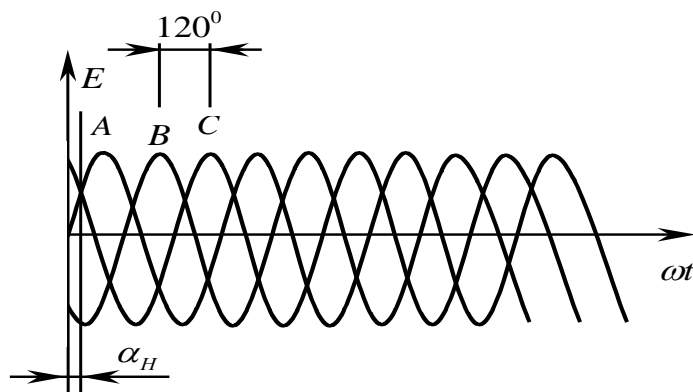
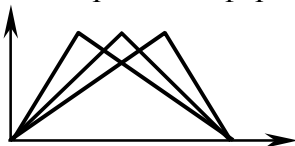


Рисунок 2.62 – Последовательность фаз питающей сети

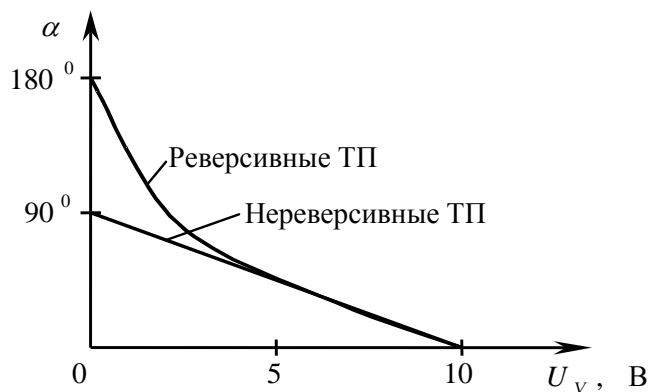
Тиристоры в тиристорных преобразователях работают в динамическом режиме: происходит запираение тиристора после окончания положительной полуволны.

Для управления каждым фазным тиристором используется система импульсно-фазового управления, реализующая различные принципы. Наиболее распространен принцип вертикального управления (рис. 2.63). Частота равна частоте сети у пилообразного напряжения. От величины угла открывания  $\alpha_p$  (угла регулирования или угла запаздывания) в выпрямленном режиме зависят величины выпрямленного напряжения. Чем меньше угол, тем больше выпрямленное напряжение.

ГПН — генератор пилообразных напряжений формирует сигналы следующего вида:



Регулировочная характеристика  $\alpha = f(U_v)$ :



Регулировочная характеристика  $U_d = f(\alpha_p)$  или  $E_\alpha = f(\alpha_p)$ :

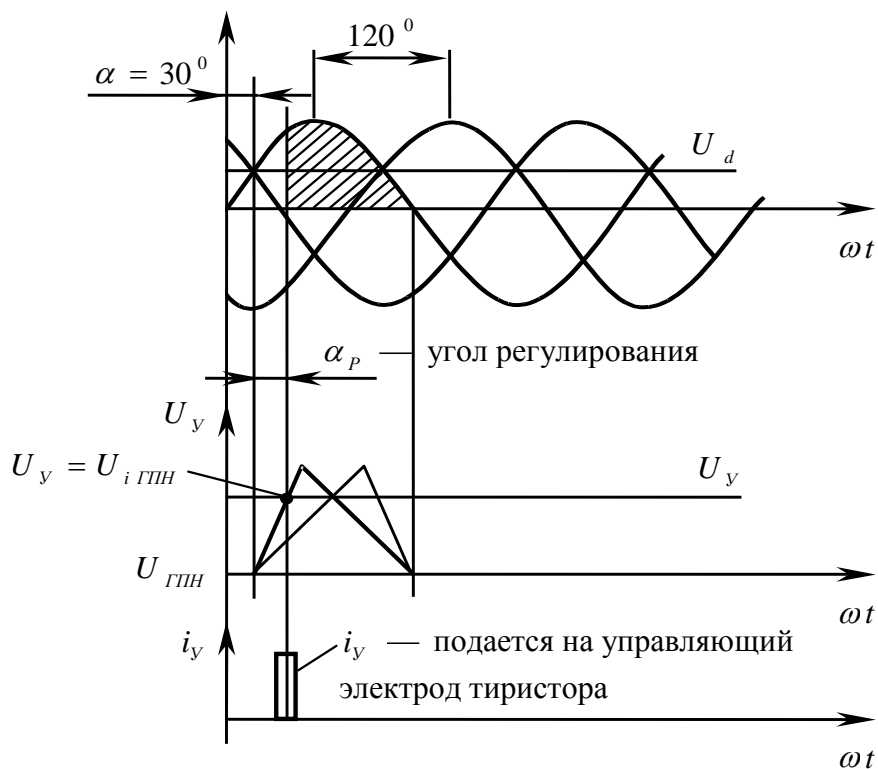
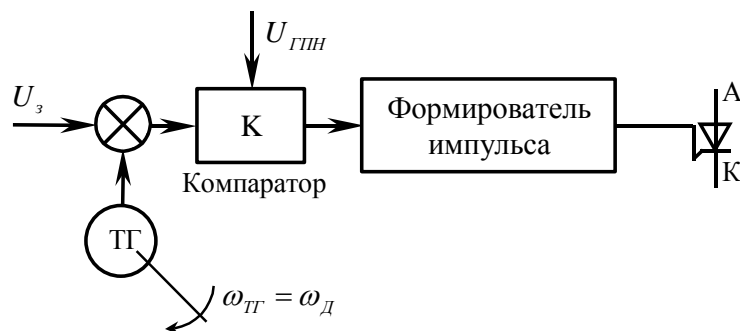
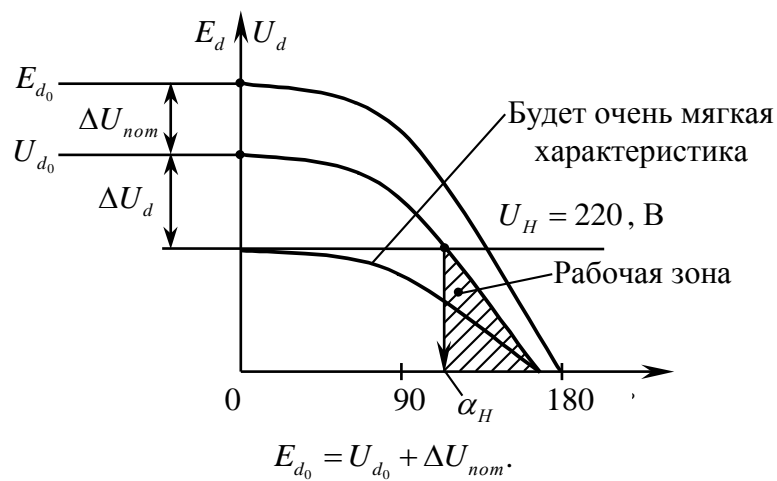


Рисунок 2.63 – Принцип вертикального управления

Внутри источника питания теряется напряжение, а не на проводах  $\Delta U_{nom}$ .

$$\Delta U_{nom} = I_H R_{(ТП+Т)},$$

где  $R_{(ТП+Т)}$  — сопротивление ТП и трансформатора.

$$E_{d_0} = U_{\phi} k_{CX_1},$$

$$E_{d_0} = U_{\mathcal{L}} k_{CX_2}.$$

В случае с нулевой схемой  $k_{CX\phi} = 1,17$  при фазном напряжении;  $k_{CX\mathcal{L}} = 0,68$ .

В случае с мостовой схемой  $k_{CX\phi} = 2,34$  при фазном напряжении;  $k_{CX\mathcal{L}} = 1,35$ .

Определяем  $E_{d_0}$ :

$$U_{d_0} = E_{d_0} - \Delta U_{nom},$$

$$E_d = E_{d_0} \cos \alpha_P,$$

где  $\Delta U_d$  — динамический запас по напряжению;  $\Delta U_d = 45...65$  В.

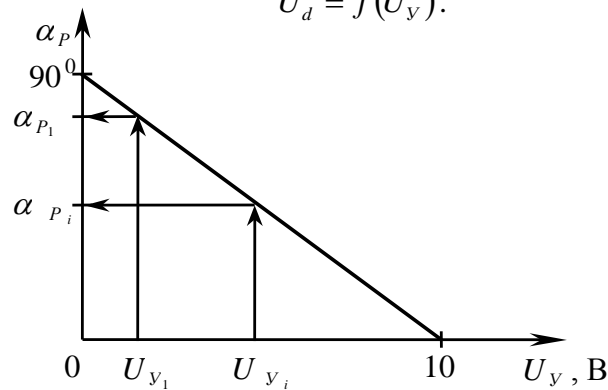
При  $U_H = 220$  В на двигателе ТП должен выдавать 260...285 В.

$$\alpha_H = 25...45^\circ.$$

Бесконечный запас создать нельзя, так как будет малая рабочая зона. Увеличивая площадь под кривой, увеличиваем возможности ТП;

в) характеристика «вход-выход»

$$U_d = f(U_y).$$



Эта характеристика строится на основании использования двух предыдущих регулировочных характеристик:

$$\alpha_P = f(U_y); U_d = f(\alpha_P).$$

По характеристике «вход-выход» определяется коэффициент передачи тиристорного преобразователя (рис. 2.64),  $k_{ТП} \sim \operatorname{tg} \alpha_{\text{наклона}}$ , где  $\alpha_{\text{наклона}}$  — угол наклона.

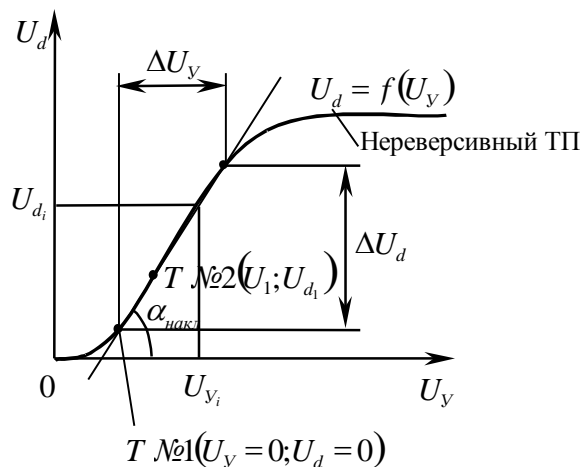


Рисунок 2.64 - Определение коэффициента передачи ТП

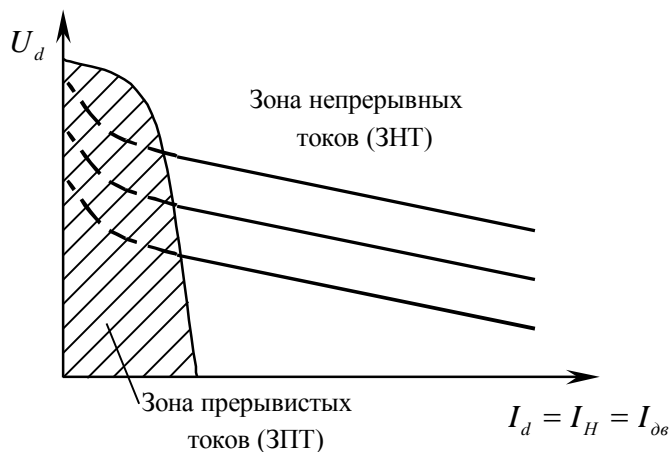
Для определения  $k_{ТП}$  линеаризуют характеристику.

$$k_{ТП} = \frac{\Delta U_d}{\Delta U_y} = 35 \dots 45.$$

$$U_d = k_{ТП} U_y.$$

Если  $U_y = 5$ , то  $U_d = 40 \cdot 5 = 200$  В;

г) нагрузочная характеристика  $U_d = f(I_H)$

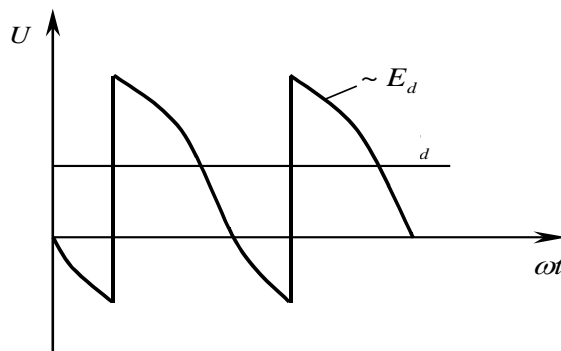


Существует семейство характеристик, которое объясняется изменением угла регулирования.

Наклон характеристики объясняется увеличением нагрузки.

Таким образом можно сформулировать следующие особенности трехфазных тиристорных преобразователей

- 1 Первой особенностью ТП является наличие в выходном напряжении как постоянной составляющей  $-E_d$ , так и переменной составляющей  $\sim E_d$ .



- 2 При больших токах нагрузки и больших индуктивностях нагрузки происходит процесс затягивания прохождения тока через тиристор. В результате образуется зона непрерывных токов.
- 3 При уменьшении тока нагрузки до тока, близкого к току удержания, и при уменьшении индуктивностей в нагрузке наблюдается прерывание тока через тиристор. Тогда образуется зона прерывистых токов;

д) электромеханическая характеристика тиристорного электропривода (рис. 2.65):

- $\omega = f(I_H)$  — электромеханическая характеристика;
- $\omega = f(M)$  — механическая характеристика.

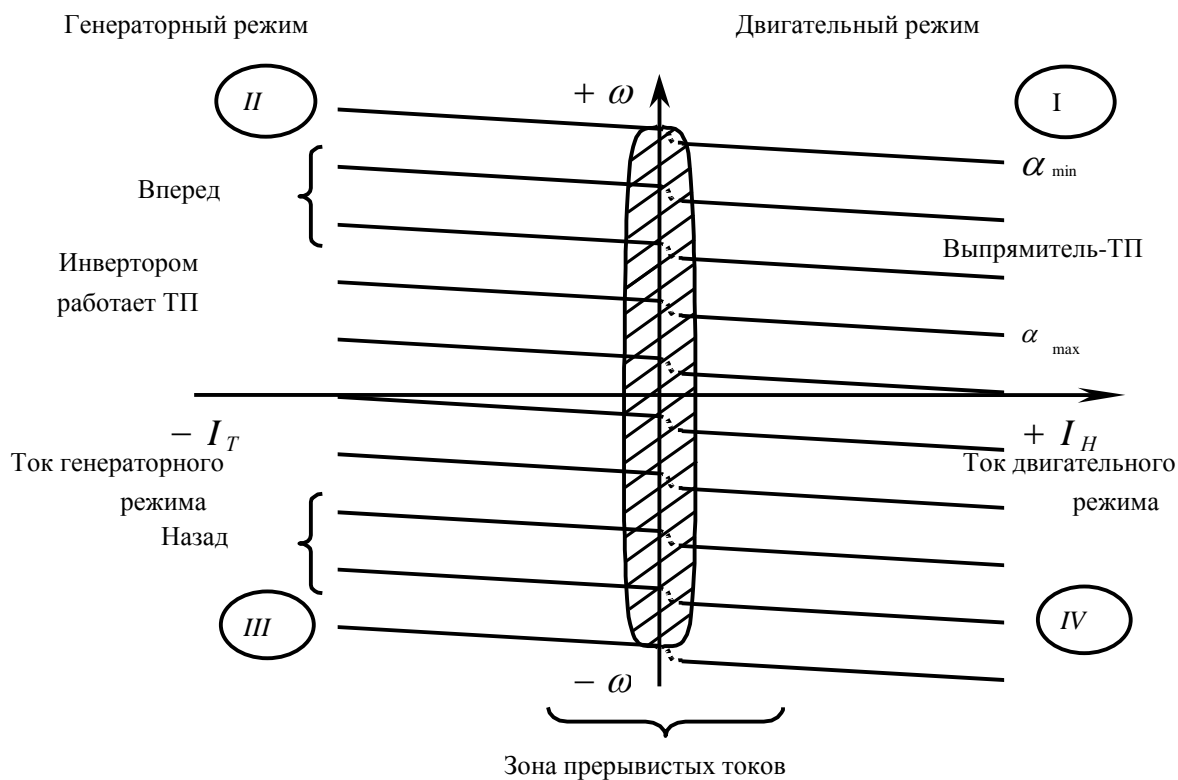


Рисунок 2.65 – Электромеханическая характеристика в 1-4 квадрантах

### 2.5.5 Инверторный режим

Это режим, при котором ТП осуществляет передачу избыточной электроэнергии от электродвигателя в сеть. Такой режим необходим для реализации генераторного торможения, которое в сравнении с динамическим режимом дает более эффективное торможение и более мягкое в сравнении с режимом противовключения (рис. 2.66).

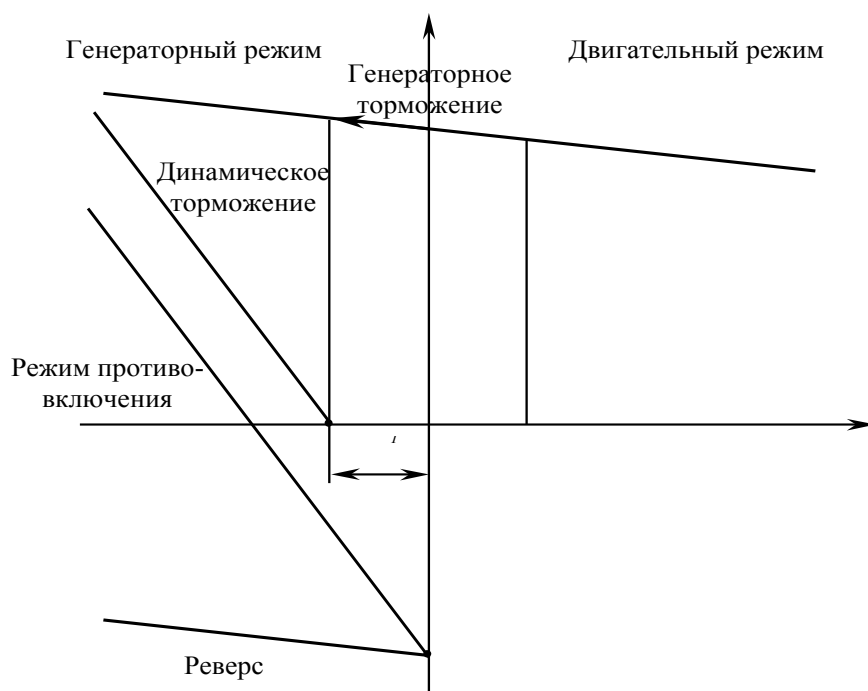


Рисунок 2.66 – Реализация генераторного режима



Генераторный режим в системе питания Г-Д легко реализуем, что иллюстрирует рис. 2.67.

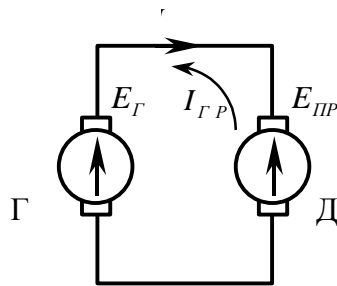


Рисунок 2.67 – Система питания Г-Д

Если  $E_Г = E_П > E_{ПР}$ , то это двигательный режим, где  $E_П$  — ЭДС преобразователя;  $E_{ПР}$  — противоЭДС.

Если же  $E_П < E_{ПР}$ , то это генераторный режим.

При использовании тиристорного преобразователя для реализации генераторного режима возникают определенные сложности (рис. 2.68).

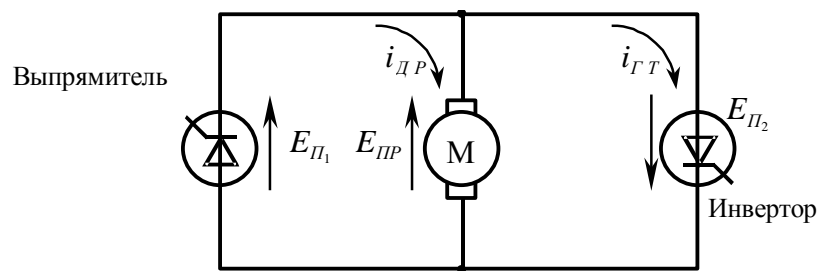


Рисунок 2.68 – Генераторный режим в системе ТП-Д

При использовании однокомплектного (неревверсивного) преобразователя может осуществляться только двигательный режим:

- $E_{П1} > E_{ПР}$  — двигательный режим;
- $E_{П2} < E_{ПР}$  — ток через преобразователь не идет — генераторного режима нет для одноконтурного ТП.

С применением второго комплекта ТП и с изменением направленности тока реализуется генераторный режим. При этом второй комплект выполняет функцию инвертора.

Величина открывания тириستоров при генераторном режиме определяется величиной угла опережения  $\beta$ :

- $\alpha$ , по сути, угол отставания, запаздывания;
- $\beta$  — угол опережения.
- $\alpha$  — при выпрямительном режиме;
- $\beta$  — при инверторном режиме.

При инверторном режиме второй комплект открывается раньше, чем пойдет ток:

$$\alpha + \beta = 180^\circ.$$

$\alpha = \beta$  — согласованное включение комплектов;

$\alpha \neq \beta$  — несогласованное включение комплектов.

## 2.5.6 Современные комплектные тиристорные преобразователи

*Функциональная схема комплектного тиристорного преобразователя.*

Составными узлами функциональной схемы являются:

- 1 Цепи главного тока:
  - АВ — автоматический выключатель;
  - СТ — согласующий трансформатор;
  - ТТ — трансформатор тока для организации обратной связи по переменному току;
  - ТП — тиристорный преобразователь;
  - М — двигатель.
- 2 Структура системы управления электроприводом:
  - ПЗС — потенциометр заданной скорости;
  - ЗИ — задатчик интенсивности;
  - РС, РТ, СИФУ, тахогенератор, регуляторы РС и РТ — выполняются на операционных усилителях со свободной схемой.
- 3 Функциональные блоки для управления ТП:
  - ПУРС — предварительный усилитель регулятора скорости;
  - ФПЕ — функциональный преобразователь ЭДС;
  - УЗТ — устройство зависимого токоограничения. Вводит коррекцию на величину нагрузки двигателя;
  - НЭ — нелинейный элемент. Формирует знак задающего напряжения;
  - ПХ — переключатель характеристики. Учитывает полярность регулировочной характеристики.  $\alpha_{нач} = 120^0$  (максимальный угол) — тиристор закрыт, напряжение минимально;
  - УЛ — устройство логики. Система сама выбирает модуль ТП, чтобы не было короткого замыкания, то есть, чтобы в реверсивном ТП источники не замкнулись друг на друга;
  - ДПВ — датчик проводимости вентилей. Информировывает УЛ о том, что напряжение в модуле стало равным нулю. ДПВ работает совместно с УЛ для реализации реверса (первый комплект закрывается, а второй — открывается).
- 4 Блок формирования задания в автоматическом режиме:
  - СЧПУ — система числового программного управления (интерполятор — устройство для формирования задания — расчета характера изменения скорости или траектории для привода подач);
  - ОР — оптронная развязка;
  - ЦАП — цифро-аналоговый преобразователь — для преобразования дискретного сигнала СЧПУ в аналоговый.

*Особенности принципиальной электрической схемы тиристорных преобразователей.*

### 5 Методика описания или чтения принципиальных схем САУ ЭП.

Выделение силовой части привода (силовая часть обозначается жирной линией): перечислить аппаратуру.

- $Q_1$  — автоматический выключатель;
- СТ — силовой или согласующий трансформатор;
- ТТ — три трансформатора тока для формирования сигнала обратной связи по переменному току;
- плавкие предохранители — для защиты;

- силовые вентильные блоки (12 вентилях): схема мостовая, преобразователь двух-комплектный, реверсивный. Два комплекта могут работать совместно или раздельно. При совместном включении используются уравнильные реакторы УР1, УР2, УР3, УР4, которые гасят токи короткого замыкания (уравнильные токи). При раздельной работе двух комплектов необходимость в уравнильных реакторах отпадает. Защиту от уравнильных токов выполняет УЛ и ДПВ (см. выше);
- СД — большая индуктивность для фильтрации и сглаживания пульсаций;
- ДП — добавочные полюса;
- РС-цепочки для разрядки энергии в период коммутации (включаются параллельно тиристорам);
- М — двигатель;
- ИО — измеритель перемещения;
- ВР — тахогенератор.

Метод реализации реверса — бесконтактный реверс (для этой схемы).

#### 6 Система управления приводом.

- КМ1, КМ2 — контакты контакторов, изменяющие полярность напряжения питания, подаваемого на задатчик интенсивности;
- ЗИ — задатчик интенсивности — устройство для формирования задающего напряжения с определенным темпом и до определенного уровня;
- РС — регулятор скорости.

Алгебраическое сложение сигнала обратной связи и задания:

- Регуляторы тока шунтируются резисторами; стабилизаторы реализуют зону нечувствительности.

#### 7 Функциональные блоки, управляющие работой преобразователя.

ПУРС, УЗТ, ФПЕ, НЭ, ПХ, УЛ, ДПВ.

Для реализации следящего электропривода, который, как правило, является трехконтурным (третий контур — контур регулирования положения), используются дополнительный регулятор положения РП и датчик положения ДП. Алгебраическое суммирование задающего сигнала и сигнала по положению осуществляется на потенциометрическом мостике: ЗП — задающий потенциометр, а ДП — датчик положения.

Как в двухконтурной САУ (для РЭП) так и в трехконтурной САУ (СЭП) реализуется теория подчиненного регулирования с последовательной коррекцией.

В САУ ЭП может подаваться сигнал из СЧПУ, как для управления скоростью, так и для управления положением.

### 2.5.7 Тиристорный преобразователь частоты

ТПЧ предназначен для питания двигателей переменного тока, масса и стоимость которых значительно ниже двигателей постоянного тока.

Преобразователи частоты позволяют регулировать скорость за счет изменения частоты, что следует из формулы

$$n = \frac{60f}{2p},$$

где  $2p$  — число пар полюсов;  $f = \text{var}$  — частота питающей сети, Гц;  $n = \text{var}$  — частота вращения, об/мин.

Механическая характеристика асинхронного двигателя (АД) имеет форму (рис. 2.69):

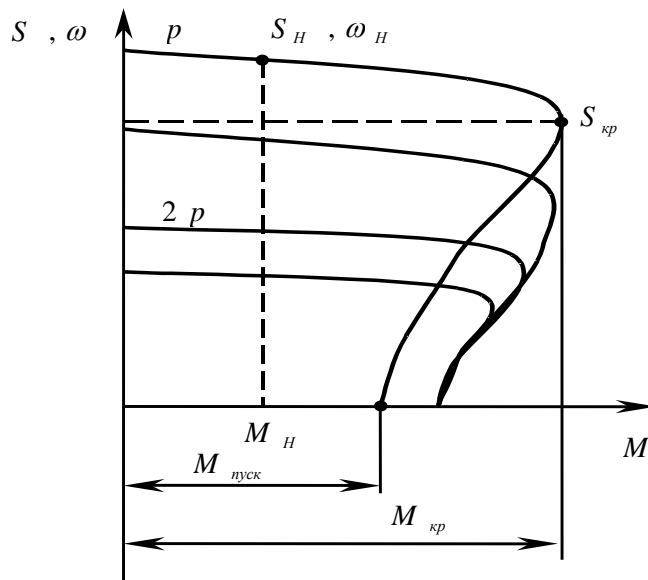


Рисунок 2.69 – Механические характеристики АД

$$M = \frac{2M_{кр}}{\frac{S}{S_{кр}} + \frac{S_{кр}}{S}}; U_{\phi} \rightarrow M_{кр};$$

$$M_{кр} = \frac{U_c^2}{f_c^2}; U_{\phi} = \sqrt{M_{кр} f^2};$$

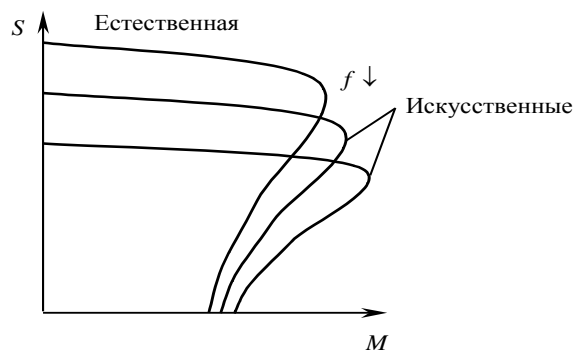
$$n = \frac{60f}{2p}.$$

Если  $f_{III} = \text{var}$ , то число оборотов меняется. Изменением частоты можно регулировать характеристики.

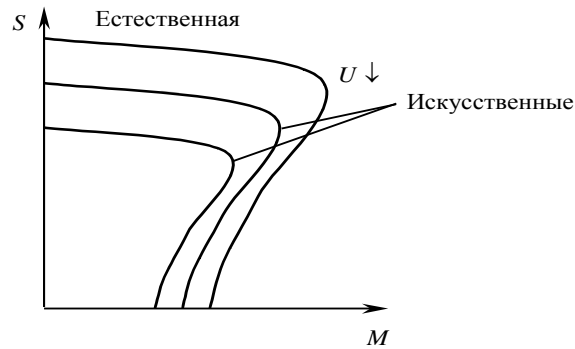
Из приведенных выражений вытекает, что дискретное регулирование (не плавное) можно осуществлять за счет изменения пар полюсов, а плавное регулирование — за счет изменения частоты питающего тока. При этом соотношение питающего напряжения и частоты оказывает существенное влияние на изменение критического момента:

$$M_{кр} = \frac{U_{\phi}^2}{f^2}.$$

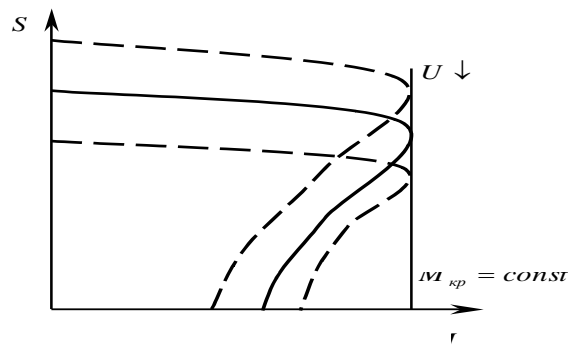
Изменение частоты:



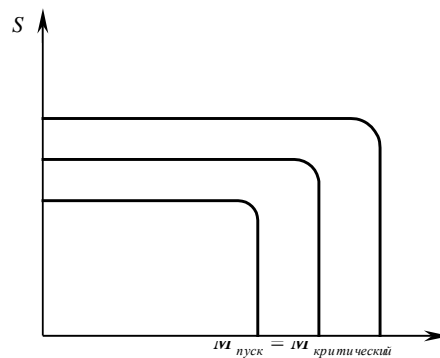
Изменение напряжения:



Изменением соотношения  $\frac{U_{\phi}^2}{f_{\phi}^2}$  так, чтобы  $M_c = const$ :



Для расширения рабочего участка и увеличения пускового момента используется замыкание системы управления:



## 2.5.8 Разновидности преобразователей частоты

- 1 Мотор-генераторная группа (система Г-Д при вращении генератора от регулируемого двигателя, например двигателя внутреннего сгорания).
- 2 Статические (тиристорные) преобразователи частоты (рис. 2.70):
  - с непосредственной связью с сетью;
  - с использованием звена постоянного тока.

Система управления вентилем СУВ формирует  $\alpha_p$ .

Система управления инвертором СУИ управляет углом инвертора  $\alpha_H$ .

$$\sim U_{fc} \rightarrow U_d \xrightarrow{\text{var}} \sim U_{fi}.$$

На основании анализа структуры ТПЧ выделяют регулирующие параметры:

- $U_d = \text{var}$ ;
- величина частоты на выходе инвертора.

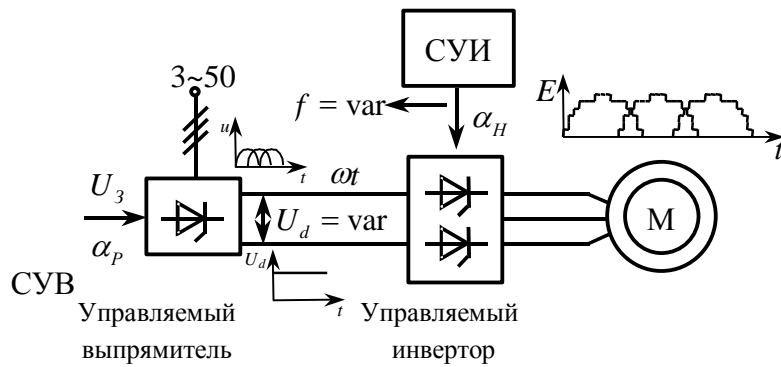


Рисунок 2.70 – Структура преобразователя частоты

Такие преобразователи (со звеном постоянного тока) разделяются на две группы:

- АИН — автономный инвертор напряжения, при котором формируется прямоугольная форма напряжения, но экспоненциальная форма изменения тока.
- 3 АИТ — автономный инвертор тока, характерной особенностью которого является наличие реактора (большое индуктивное сопротивление), который позволяет формировать прямоугольную форму тока и экспоненциальное напряжение.

### 2.5.9 Особенности стандартных ТПЧ на базе АИТ

Принципиальная схема ТПЧ с обратными связями показана на рис. 2.71.

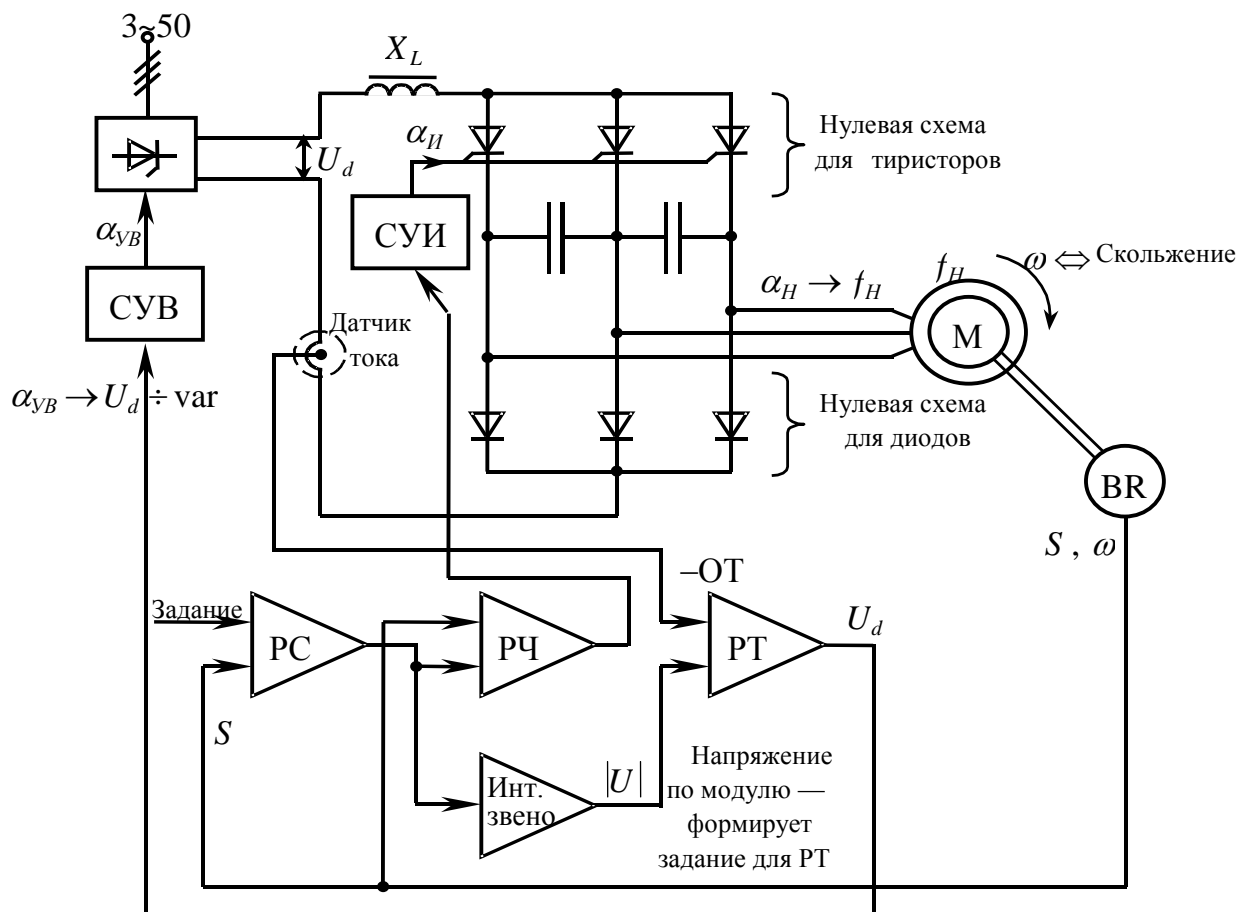


Рисунок 2.71 – Принципиальная схема ТПЧ с обратными связями

На рисунке обозначены:

- РС — регулятор скольжения или регулятор скорости;
- РЧ — регулятор частоты;
- РТ — регулятор тока;
- СУИ — схема управления инвертором;
- СУВ — схема управления выпрямителем;
- М — двигатель;
- BR — датчик скорости (тахогенератор);
- ОТ — обратная связь (в данном случае — по току).

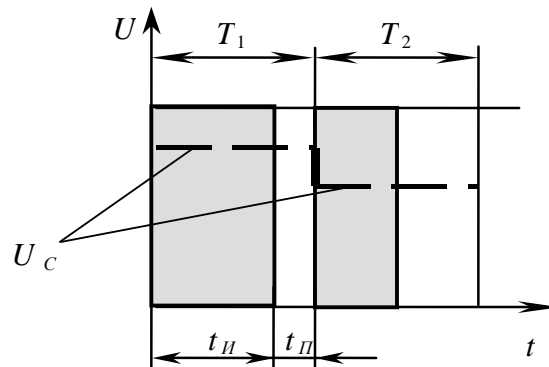
### 2.5.10 Особенности широтно-импульсного преобразователя (ШИП)

ШИП предназначен для регулирования угловой скорости  $\omega$ , рад/с, или частоты вращения  $n$ , об/мин, в двигателях постоянного тока (ДПТ) независимого возбуждения при малых мощностях (несколько киловатт) за счет импульсной коммутации источника питания к потребителю.

Основные элементы привода на базе ШИП:

- источник питания (ИП);
- ключ;
- нагрузка: ДПТ.

Идея работы ШИП основана на широтной модуляции (рис. 2.72).



$t_{И}$  — время импульса;  $t_{П}$  — время паузы

Рисунок 2.72 – Широтно-импульсная модуляция сигнала

Скважность определяется:

$$\gamma = \frac{t_{И}}{t_{И} + t_{П}} = \frac{t_{И}}{T}.$$

В пределах периода меняем ширину импульса.

В рассматриваемом преобразователе в результате импульсного приложения напряжения от источника питания к потребителю будет меняться величина среднего напряжения на выходе самого преобразователя.

$$\gamma = \frac{t_{И}}{T} = \frac{t_{И}}{t_{И} + t_{П}} = (0 \div 1);$$

$$U_{cp} = \gamma U_{ИП}.$$

Функциональная схема ШИП представлена на рис. 2.73.

Источником питания могут быть неуправляемый выпрямитель с ЭДС постоянной величины  $E_{П}$ , сеть постоянного тока в городском или магистральном электротранспорте, аккумуляторная батарея.

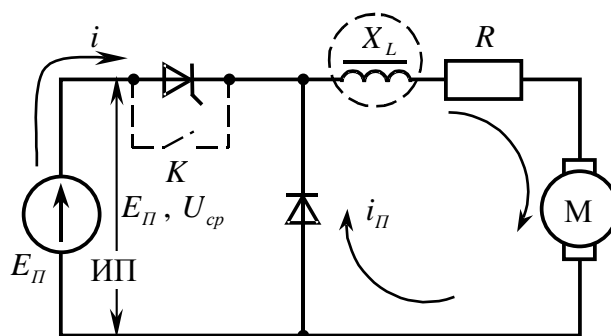


Рисунок 2.73 – Функциональная схема ШИП

Ключ — транзисторные или тиристорные ключи. Тиристорные сложнее, так как у тиристора есть статический и динамический режим. Недостаток ШИП на тиристорах — усложнение схемы закрывания тиристоров в статическом режиме.

Частота следования импульсов — в пределах от 500 до 2000 Гц, что превышает на порядок ширину пропускаемых импульсов в реальных системах, поэтому ШИП рассматривается в виде непрерывного звена. Диаграммы токов и напряжений в таком преобразователе имеют следующий вид (рис. 2.74).

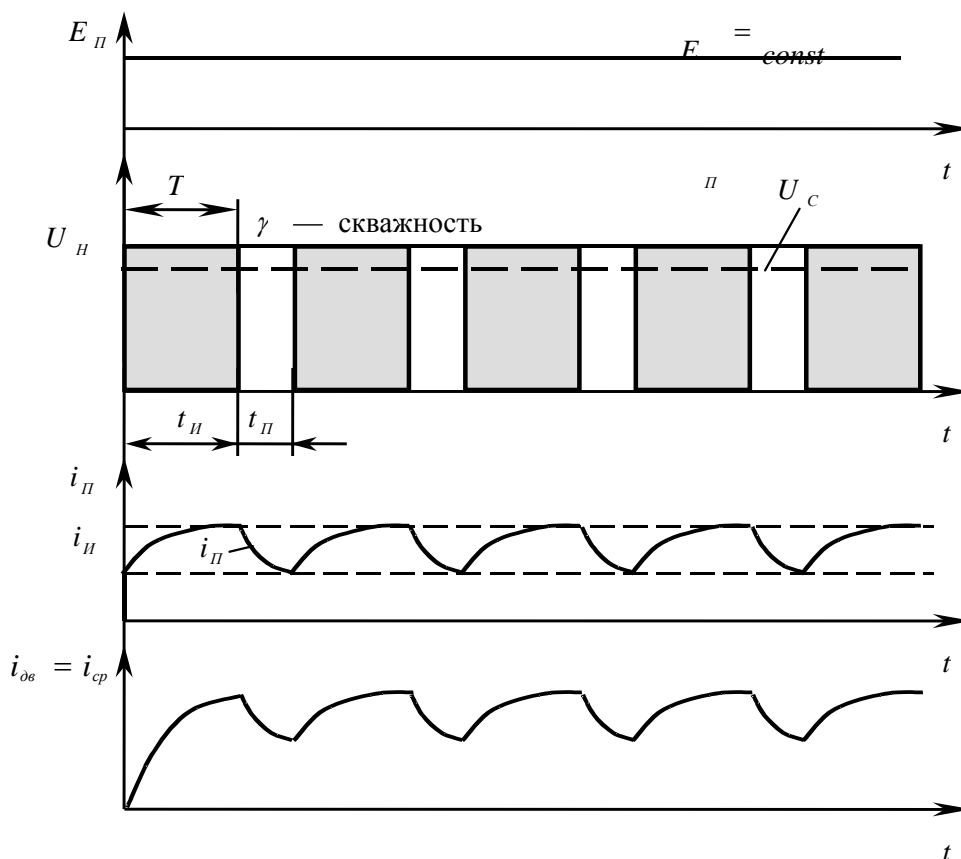


Рисунок 2.74 – Диаграмма токов и напряжений в ШИП

В период паузы действует ЭДС самоиндукции в индуктивной нагрузке.

#### Параметры ШИП:

- скважность;
- коэффициент преобразования (меньше единицы);
- регулировочные характеристики.

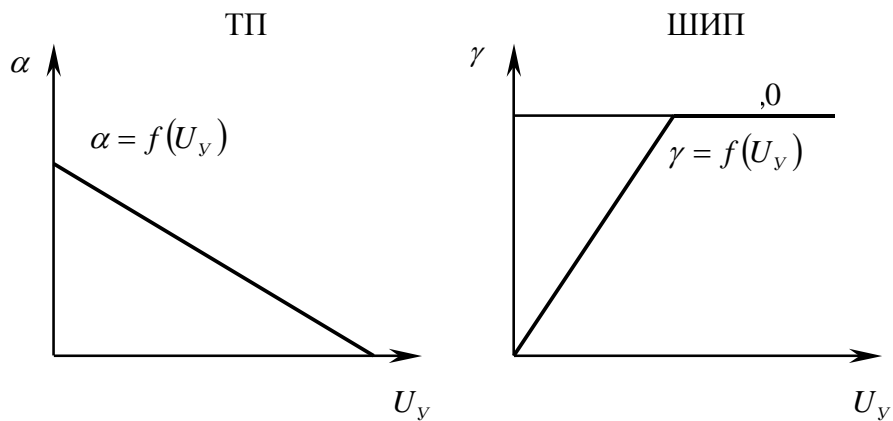


Основным аргументом в тиристорных преобразователях является угол открытия тиристор, а в ШИП — скважность.

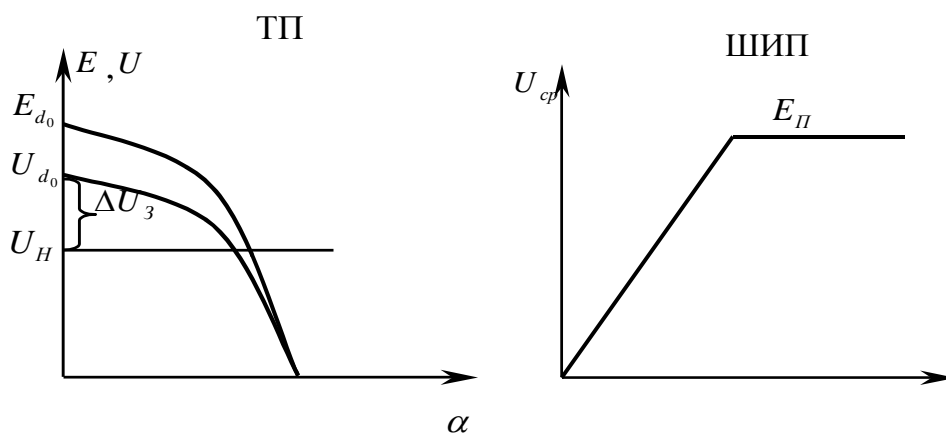
4 Регулировочные характеристики:

5

а)

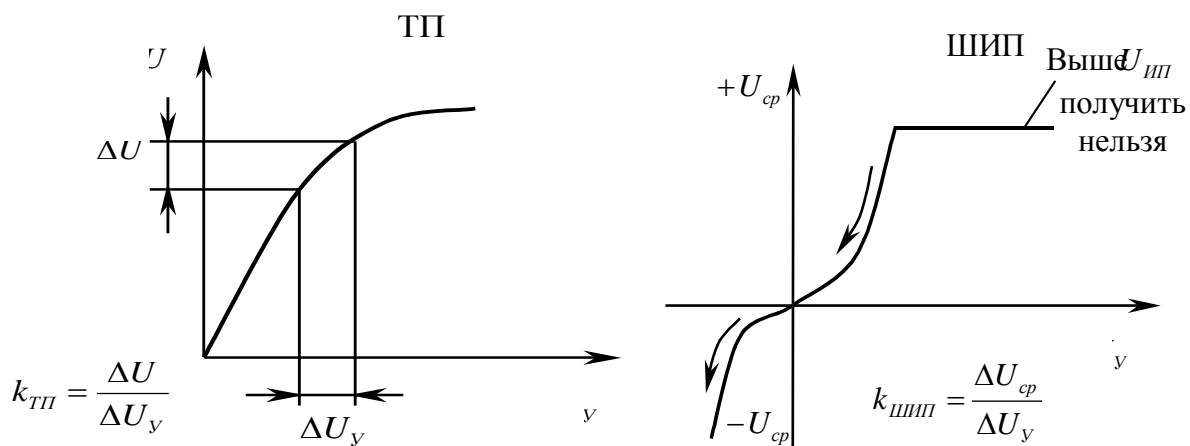


б)



6 Характеристика «вход-выход»:

7



### 2.5.11 Особенности реверсивного ШИП

Для реверса в ШИП необходимо менять полярность питающего напряжения. Для этого используются две пары ключей (транзисторные или тиристорные), которые и выполняют указанную задачу.

Реализация представленной выше идеи приведена на рис. 2.75. Ключи управляются попарно.

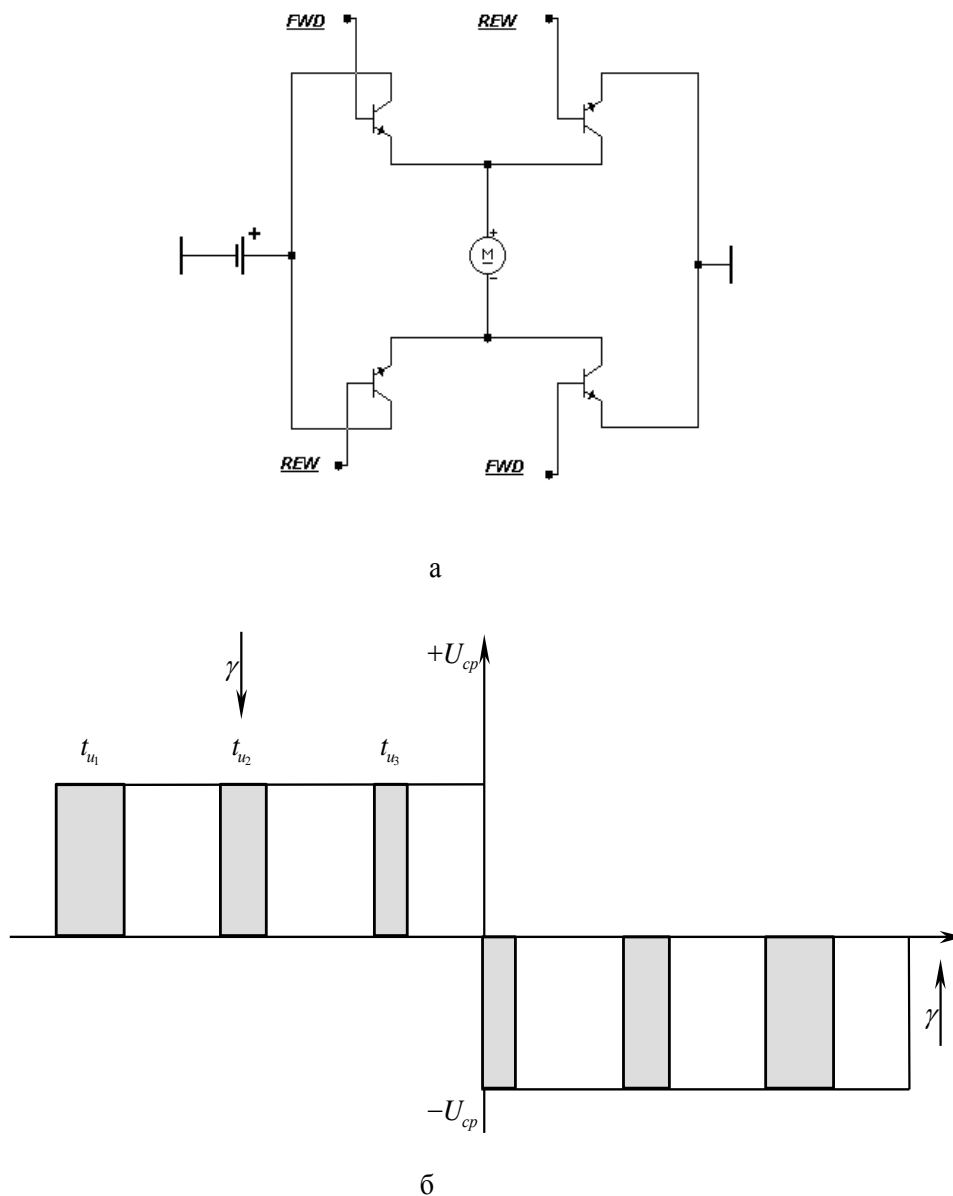


Рисунок 2.75 - Схема реверсивного ШИП (а)  
и принцип импульсного управления (б)

### 3 СТАНОЧНЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД

Его основные разновидности – регулируемый и следящий электроприводы (РЭП и СЭП соответственно).

#### 3.1 Определение, конструктивные и технологические особенности РЭП

САУ РЭП предназначен для приведения во вращение инструмента или детали в процессе ее обработки: регулирование скорости и ее стабилизации на заданном уровне (рис. 3.1).

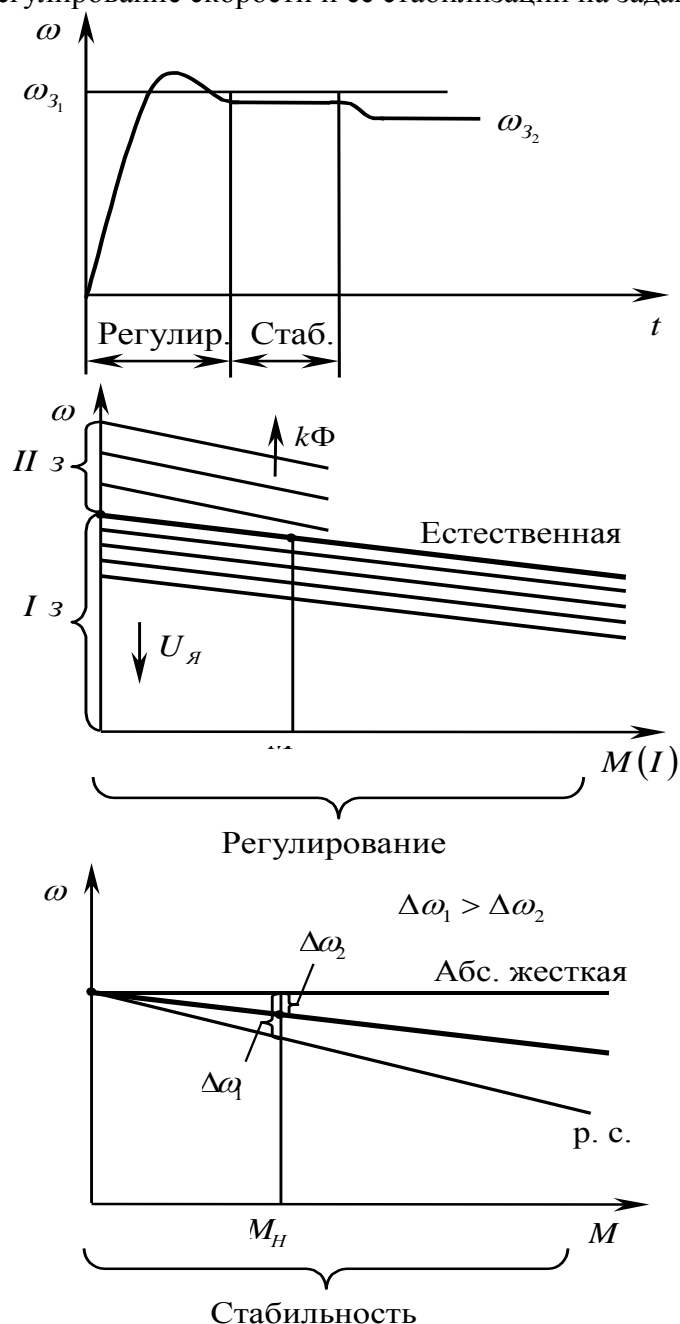


Рисунок 3.1 – Стабилизация скорости в САУ РЭП

#### 3.1.1 Структура РЭП

РЭП состоит из следующих элементов (рис. 3.2):

- ИП (источник питания): преобразователь, усилитель;
- ОУ: (ДПТ, АД), где ОУ — объект управления.

Регулятор расширяет диапазон регулирования и диапазон момента.

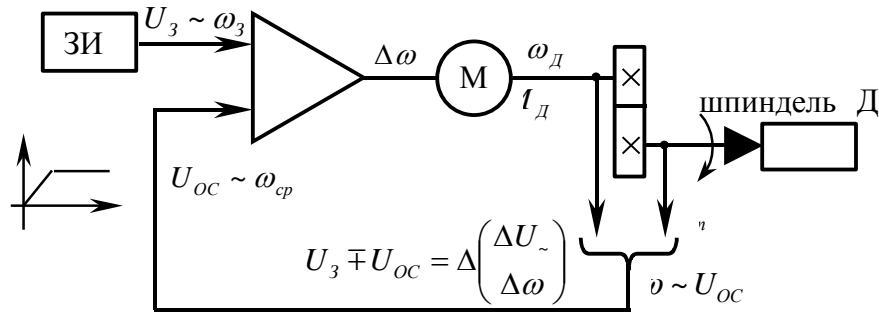


Рисунок 3.2 – Структура РЭП

Структура РЭП содержит следующие основные узлы:

- 1 объект управления: двигатель, редуктор, шпиндель ОУ: М, Р, Ш;
- 2 источник питания выполняет функции преобразователя, усилителя и элемента сравнения ИП: П, У, ЭС;
- 3 ЗИ — задатчик интенсивности;
- 4 датчики обратных связей (ДОС).

### 3.1.2 Конструктивные и технологические особенности САУ РЭП

*Конструктивные особенности* - наличие ДОС, ЗИ, ИП, ОУ.

*Технологические особенности:* сущность технологических особенностей сводится к заданию скорости (частоты вращения) шпинделя с соответствующими параметрами по диапазону скоростей, по диапазону моментов, по допустимому ускорению; к стабилизации задаваемой скорости тоже с определенными параметрами  $\Delta\omega$ ,  $\sigma$ .  $\Delta\omega$  — размерная величина в рад/с или об/с, а  $\sigma$  — в % — относительная величина.

$$\Delta\omega \leq \omega_{дон}; \sigma \leq \sigma_{дон}.$$

Технологические особенности определяют режимы работы привода.

1 *Длительный режим работы.*

$$P = M_p \omega,$$

где  $M_p$  — момент резания.

В длительном режиме работают токарные, сверлильные, шлифовальные станки.

2 *Повторно-кратковременный режим работы.*

В этом режиме работают долбежные, строгальные, отрезные станки (рис. 3.3).

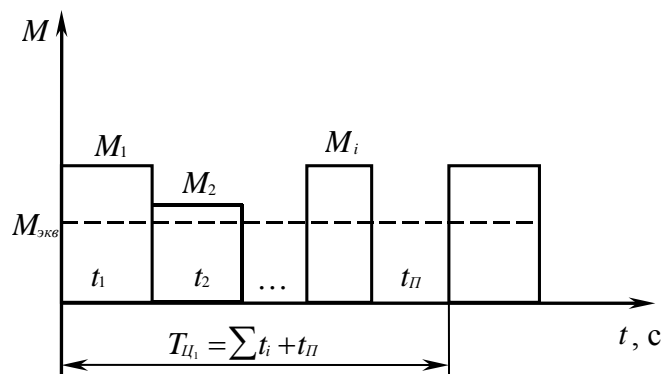


Рисунок 3.3 – Нагрузочная диаграмма механизма с повторно-кратковременным режимом работы

$t_{II}$  — время паузы;

$M_{э\kappa\beta}$  — эквивалентный момент.

$$P = M_{э\kappa\beta} \omega,$$

где  $M_{э\kappa\beta}$  — среднеквадратичный момент, величина которого определяется из нагрузочной диаграммы.

$$M_{э\kappa\beta} = \sqrt{\frac{\sum M_i^2 t_i}{T_{II}}},$$

где  $T_{II}$  — время цикла.

Расчет эквивалентного момента позволяет осуществлять проверку выбранного двигателя по нагреву:

$$M_{э\kappa\beta} \leq M_H.$$

Проверка по перегрузке:

$$\lambda = \frac{M_{\max}}{M_{ном}},$$

где  $\lambda$  — перегрузочная способность:

- $\lambda = 1,8 \dots 2,2$  — для станочного электропривода;
- $\lambda = 4$  — для кранов;
- $\lambda = 6$  — для экскаваторов.

### 3.1.3 Требования, предъявляемые к РЭП

К РЭП предъявляются следующие требования:

- 1 РЭП должен обеспечить обработку деталей с различными режимами резания способами регулирования скорости (механический способ регулирования скорости, электрический способ регулирования: изменение напряжения на якоре (I зона) и магнитного потока на обмотке возбуждения (II зона)).
- 2 РЭП должен обеспечить расширение диапазонов регулирования по скорости с номинальными параметрами, расширение диапазона по мощности с сохранением требований по жесткости, и должны выполняться требования по динамике (динамическая погрешность, быстродействие). Указанные требования определены нормативными документами (ГОСТ 3573-82).
- 3 РЭП должен обеспечивать предельную или допустимую суммарную погрешность уровня скорости:

$$\sum \Delta \omega_i (\sigma_{дон}) \leq \omega_{дон},$$

где  $\sigma_{дон}$  или  $\omega_{дон}$  — определяются технологией.

$\Delta \omega_i$  включает в себя следующие величины:

- $\Delta \omega_M$  — погрешность от действия момента нагрузки:

$$\Delta \omega_M = \frac{\omega_{M_H} - \omega_{M_T}}{\omega_{M_H}} 100\% ;$$

- $\Delta \omega_U$  — погрешность от колебания напряжения сети:

$$\Delta \omega_U = \frac{\omega_{U_H} - \omega_{U_{\downarrow}}}{\omega_{U_H}} 100\% ;$$

- $\Delta \omega_P$  — погрешность, возникающую при реверсировании:

$$\Delta \omega_P = \frac{\omega_{\lambda} - \omega_{np}}{\omega_{cp}} 100\% ,$$

где  $\omega_l$  — левое;

$\omega_{np}$  — правое;

$\omega_{cp} = \frac{\omega_l + \omega_{np}}{2}$  — среднее;

–  $\Delta\omega_{t_0}$  — погрешность, возникающую при изменении температуры:

$$\Delta\omega_p = \frac{\omega_{25^0} - \omega_{45^0}}{\omega_{cp}} 100\%$$

$$\Delta\omega_i = (2...15)\% ;$$

$$\sum \Delta\omega_i \leq 30\% .$$

Для уменьшения просадки скорости необходимо:

- для  $\Delta\omega_M$  — за счет применения того или иного вида обратной связи;
- для  $\Delta\omega_U$  — за счет стабилизации напряжения;
- для  $\Delta\omega_p$  — за счет более качественного изготовления коробки скоростей, исключая люфты;
- для  $\Delta\omega_{t_0}$  — за счет охлаждения (стабилизации скорости);

4 Поддержание коэффициента неравномерности угловой скорости должно быть в пределах:

$$k_H = k_p = 0,01...0,25 ,$$

где  $k_p = \frac{\omega_{\max} - \omega_{\min}}{\omega_{cp}} .$

5 По диапазону скорости:

$$D = D_{II} D_I D_{II} ,$$
$$4 \ 10 \ 10 ,$$

где  $D_I$  — диапазон за счет изменения напряжения;  $D_{II}$  — диапазон за счет изменения момента;  $D_{II}$  — редуктор.

Средний диапазон — несколько сотен единиц.

- 6 Диапазон по мощности — от 2,5 до 200 кВт.
- 7 Абсолютный диапазон скоростей — от 750 до 3000 об/мин.
- 8 Полоса пропускания (максимальные частоты): 10...20 Гц.
- 9 Допустимое ускорение — не более 1000 рад/с<sup>2</sup>.
- 10 Диапазон колебания моментов — от 0,5 до 350 Н·м.
- 11 Напряжение управления — до 10 В.

### 3.2 Определение, конструктивные и технологические особенности СЭП

СЭП выполняет функцию следящей системы, осуществляя перемещение заготовки или инструмента с быстрыми или рабочими скоростями с выходом на позицию (положение инструмента или детали) с целью снятия новых слоев металла.

#### 3.2.1 Конструктивные особенности СЭП

На рис.3.4 представлена структура СЭП расточного станка, где обозначены:

$l_3$  или  $\varphi_3$  — величины перемещения в линейных или угловых координатах;

ИП — источник питания;

ХВ — ходовой винт ( $\omega \rightarrow l$  — угловая скорость преобразуется в линейное перемещение);

ДПЗ — датчик положения на столе.

$v_p$  — скорость рабочих перемещений.

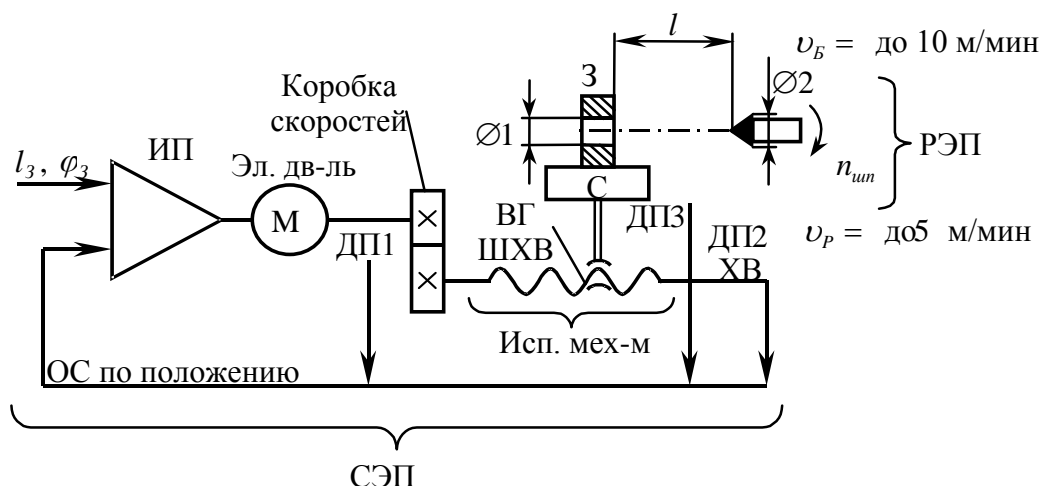
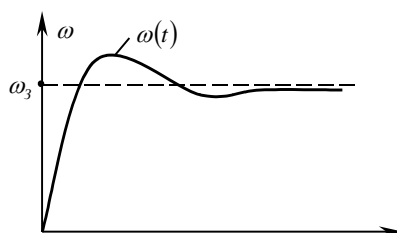


Рисунок 3.4 – Структура СЭП

Рассмотрим технологические особенности СЭП.

Основная задача — подвод детали к инструменту на величину  $l$  (перемещение на заданную величину).

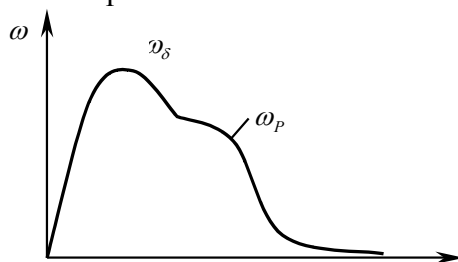
РЭП (задание по  $\omega_3$ ):



СЭП (задание по положению):



Задание по положению и по скорости:



### 13 Токарный станок.

Основная задача — подвод инструмента к детали величину  $h$ , или перемещение заготовки из начального положения в точку соприкосновения с инструментом на большой скорости (рис.3.4).

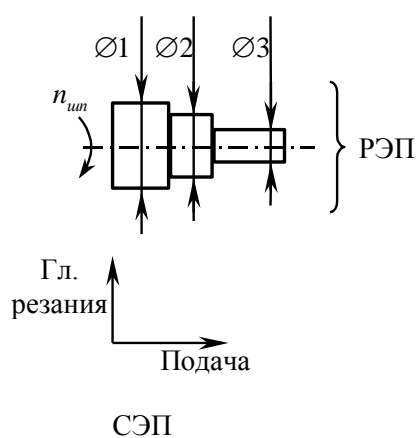
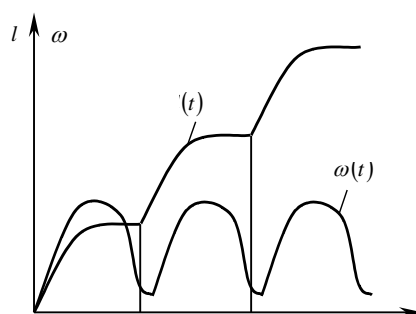


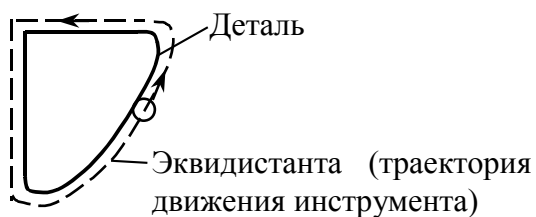
Рисунок 3.4 – Назначение приводов токарного станка

Задание осуществляется по положению и по скорости.



### 14 Фрезерный станок.

Основная задача — обеспечить требуемую траекторию движения инструмента относительно заготовки.



Задание осуществляется по скорости и по ускорению:  $v$  и  $\varepsilon$ .



### 3.2.2 Требования, предъявляемые к СЭП

К СЭП предъявляются следующие требования:

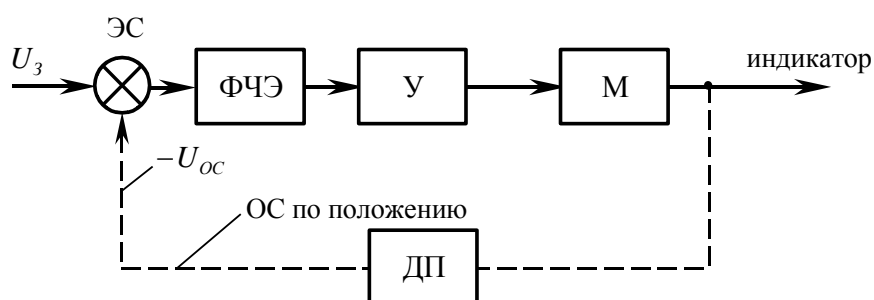
- 1 Повышенная точность обработки (микроны).
- 2 Стабильность, повторяемость размеров детали.
- 3 Повышенная чистота обработки детали.
- 4 Колебания моментов в длительном режиме: привод должен обеспечить колебания моментов от 0,35 до 170 Н·м.
- 5 Общий диапазон регулирования скорости: до нескольких десятков тысяч единиц.
- 6 Привод должен обеспечивать быстродействие в пределах десятых долей секунды.
- 7 Коэффициент неравномерности — 0,4.
- 8 Привод должен обеспечивать угловое ускорение от 3000 до 5000 рад/с<sup>2</sup>.
- 9 Полоса пропускания от 20 до 45 Гц.
- 10 Срок службы без ремонта — 5 лет.
- 11 Время наработки на отказ — до 4000 часов.
- 12 Дискретные датчики положения в СЭП должны иметь ошибку не более 5 дискрет/оборот.
- 13 Напряжение управления — 10 В.

### 3.2.3 Разновидности СЭП

По структуре и назначению различают следующие виды СЭП:

- 1 Одноконтурные индикаторные системы (рис. 3.5).

Регулирование может осуществляться по положению, по скорости, по ускорению.



$U$  — усилитель; ЭС — потенциометрический мост, операционный усилитель, сельсин-датчик;  $Y$  — ТП, ТПЧ, ШИП и т. д.;  $M$  — ДПТ, АД

Рисунок 3.5 – Структура индикаторной системы

- 2 Многоконтурные системы с регулированием только положения или положения и скорости, или положения, скорости и тока (см. раздел 1, п. 1.3).

Разновидности СЭП по порядку астатизма (по количеству интегрирующих звеньев, расположенных до точки приложения нагрузки) приведены в табл. 3.1.

Таблица 3.1 - Разновидности СЭП по порядку астатизма

Порядок астатизма	Вид системы
$\nu = 0$	Статические системы. Ошибка пропорциональна моменту сопротивления
$\nu = 1$	Астатические первого порядка (системы с однократным интегрированием), ошибки не находятся в прямой зависимости от нагрузки
$\nu = 2$	Астатические системы второго порядка (системы с двукратным интегрированием), ошибка стремится к нулю. Для прецизионных станков
$\nu = 3$	Астатические системы третьего порядка

Разновидности СЭП по элементной базе:

- релейные;
- сельсинные;
- электромашинные;
- тиристорные;
- с использованием ШИП;
- на шаговых двигателях с электронным коммутатором.

Разновидности СЭП по видам сигналов:

- аналоговые;
- аналого-цифровые;
- цифровые.

Разновидности СЭП по закону регулирования:

- 3.1.1.1.1 статические;
- 3.1.1.1.2 астатические.

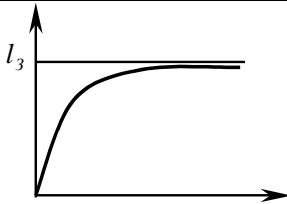
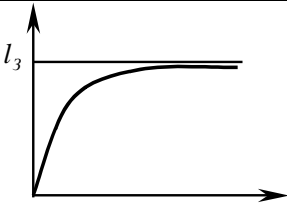
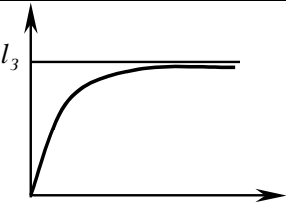
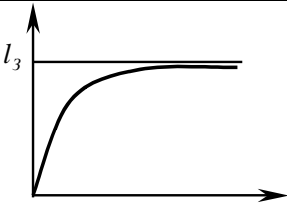
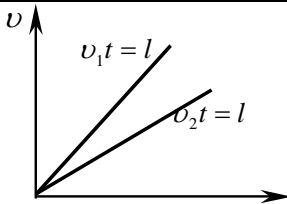
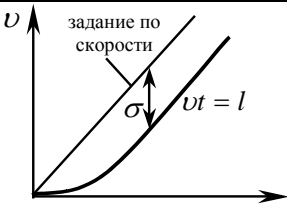
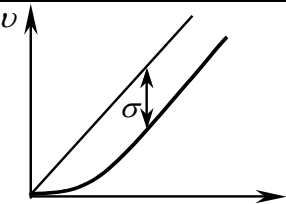
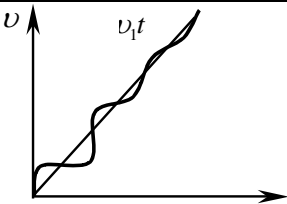
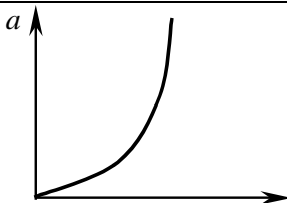
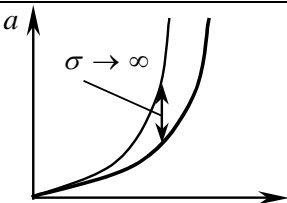
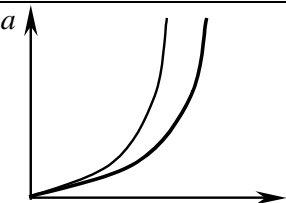
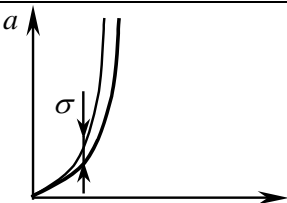
Разновидности СЭП по области применения:

- станочный привод (привод подач) — продольная и поперечная подачи;
- системы синхронизации приводов в нажимных устройствах прокатных станов, козловые и порталные краны.

### 3.2.4 Классификация следящих приводов по виду задания, по порядку астатизма, по виду переходных процессов и по величине ошибки

Классификация сведена в табл. 3.2.

Таблица 3.2 - Классификация следящих приводов

Вид задания	Статические САУ	Астатические САУ I порядка	Астатические САУ II порядка
Задание по положению	$\sigma = \frac{l_3}{1+k}$	$\sigma \rightarrow 0$	$\sigma \rightarrow 0$
			
Задание по скорости	$\sigma \rightarrow \infty$	$\sigma = \frac{v_3}{k_v}$	$\sigma \rightarrow 0$
			
Задание по ускорению $l = \frac{at^2}{2}$	$\sigma \rightarrow \infty$	$\sigma \rightarrow \infty$	$\sigma = \frac{\alpha_3}{k_a}$
			

Примечание.  $a, \varepsilon$  - задание по ускорению при сложных эквидистантах, то есть при обработке деталей сложных форм.  $v_3$  — задание по скорости;  $k_v$  — коэффициент задания по скорости.

### 3.3 Особенности двухзонного регулирования

Двухзонное регулирование скорости (рис. 3.6) применяется как в РЭП, так и в СЭП для расширения диапазонов регулирования скорости при одновременном снижении вращающего момента.

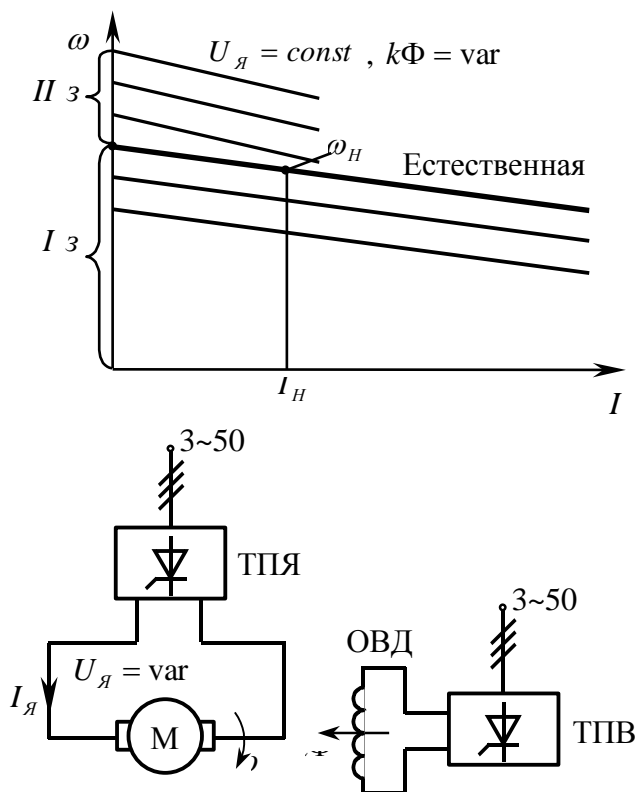


Рисунок 3.6 – Реализация двухзонного регулирования скорости

Первая зона — регулирование скорости вниз от номинальной за счет снижения напряжения, подводимого к якору (рис. 3.7).

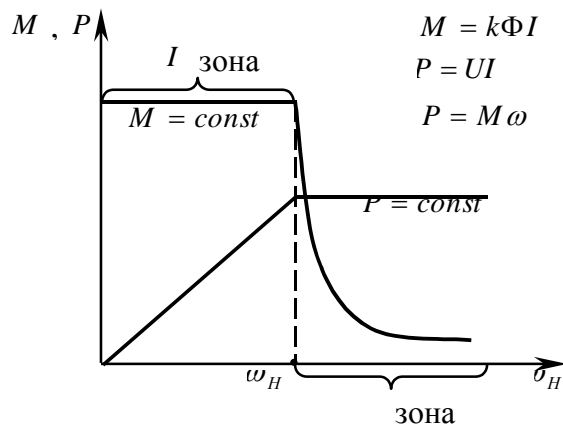


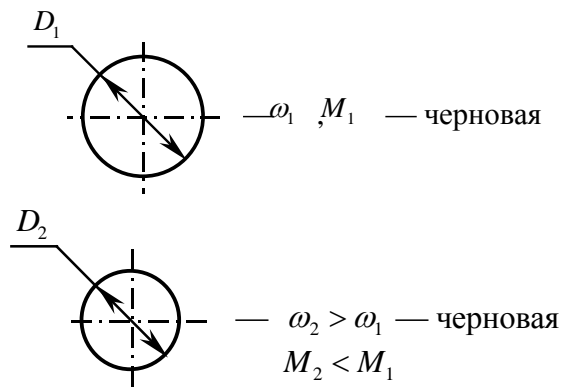
Рисунок 3.7 – Параметры привода в первой зоне регулирования

$$\omega = \frac{U_{\text{я}}}{k\Phi} - I \frac{R_{\text{я}}}{k\Phi}, \quad M \downarrow = k\Phi \downarrow I.$$

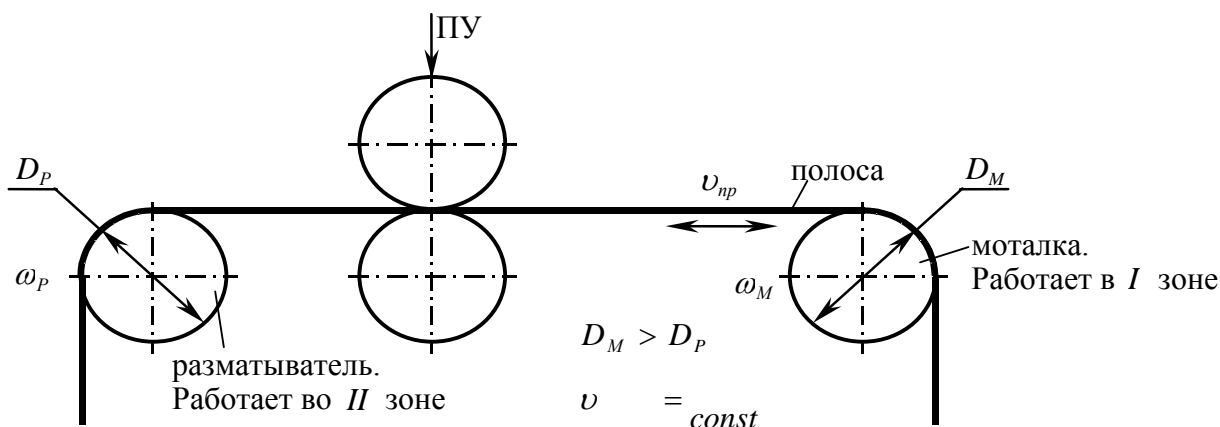
Вторая зона – для малых моментов и большой скорости (чистовая обработка).

Области применения:

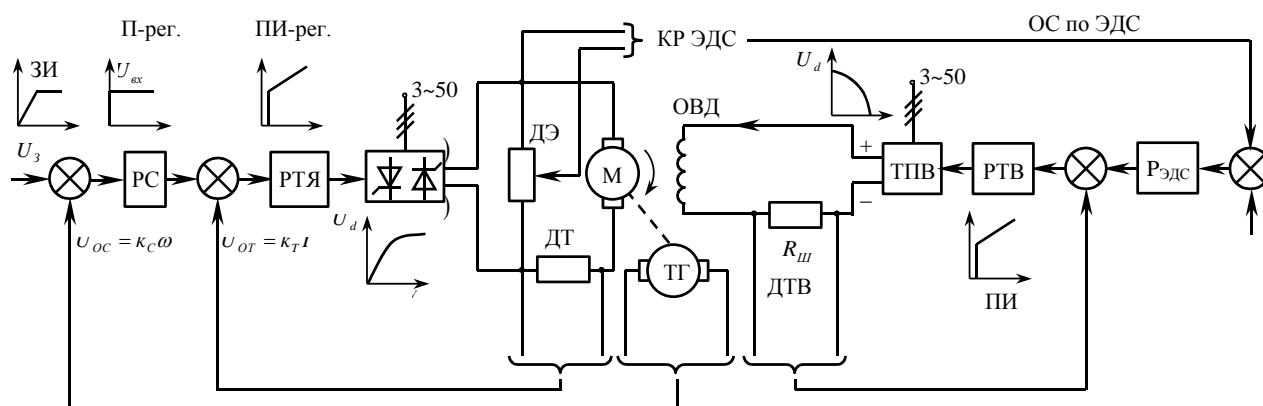
- 1 Применяется в станочном приводе для осуществления как черновой, так и чистовой обработки.



- 2 На прокатных станах.



Функциональная схема двухзонного <sup>полосы</sup>регулирования скорости привода представлена на рис. 3.8.



ДЭ — датчик ЭДС; КР ЭДС — к регулятору ЭДС

Рисунок 3.8 – Функциональная схема двухзонного регулирования скорости приводов

На вход системы подается напряжение задания, пропорциональное необходимой скорости (в *I* зоне равно или меньше номинального, во *II* зоне — больше номинального).

Кроме того, в систему дается установка по величине ЭДС, поступающая на вход управления второй зоной ( $ЭДС_H = U_H$ ).

Первая зона работает по известным нам правилам (как обычный РЭП). При необходимости перехода во *II* зону  $U_3$  повышается, в результате чего РС стремится повысить на выходе значение ЭДС.

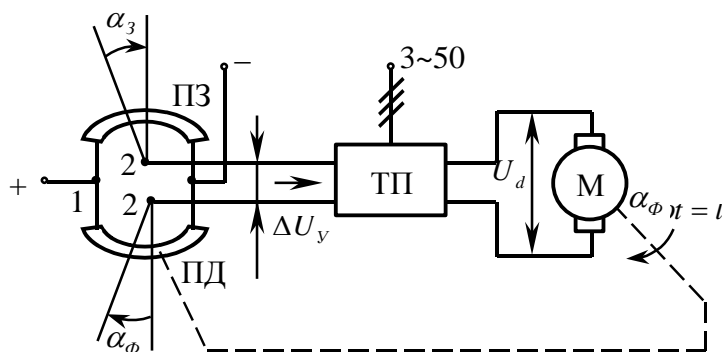
При работе в *I* зоне РТВ переходит в режим насыщения, что обеспечивает постоянный ток возбуждения.

При реакции РС на повышение напряжения задания на вход второй зоны поступает повышенное значение ЭДС двигателя, превышающее установку по ЭДС. В результате разность между фактической и заданной ЭДС выводит РТВ из режима насыщения, что приводит к уменьшению напряжения на выходе ТПВ и ослаблению  $k\Phi$ : переходим во *II* зону.

### 3.3.1 Примеры реализации следящего электропривода

Рассмотрим несколько примеров реализации СЭП:

1 СЭП с системой питания ТП-ДПТ с реостатной обратной связью (рис. 3.9).



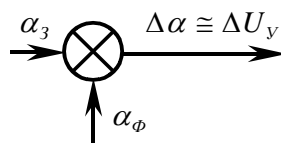
ПЗ — потенциометрический задатчик; ПД — потенциометрический датчик;  
 $\alpha_3$  — угол поворота ползунка ПЗ;  $\alpha_\phi$  — угол поворота ползунка датчика положения ПД

Рисунок 3.9 – СЭП с реостатной обратной связью

Регулирование производится по отклонению.

$$\alpha_3 - \alpha_\phi = \Delta U_y;$$

$$\Delta U_y \cdot k_{ТП} = U_d.$$



Сельсины, поворотные трансформаторы могут применяться вместо потенциометрических датчиков.

2 СЭП на базе ТП-ДПТ с аналоговыми и дискретными датчиками (рис. 3.10).

Характерной особенностью рассматриваемой системы является особая реализация контура положения:

- 1 Аналоговый контур положения: аналоговый датчик на сельсинах, поворотных трансформаторах, аналоговый регулятор положения, задатчик интенсивности и т. д.
- 2 Дискретный контур положения реализован на импульсном датчике положения ИДП (дискретном цифровом регуляторе положения), задание на который может

SS — аналого-  
вый датчик по-  
ложения

Импульсный  
датчик положения (дискрет-  
ный)

Рисунок 3.10 – СЭП с аналоговыми и дискретными датчиками

### Особенности системы:

- ### 3.3.2 Ошибки в СЭП

- 1 Точность обработки (воспроизводимость задания).
- 2 Шероховатость, то есть качество обработки.
- 3 Производительность.

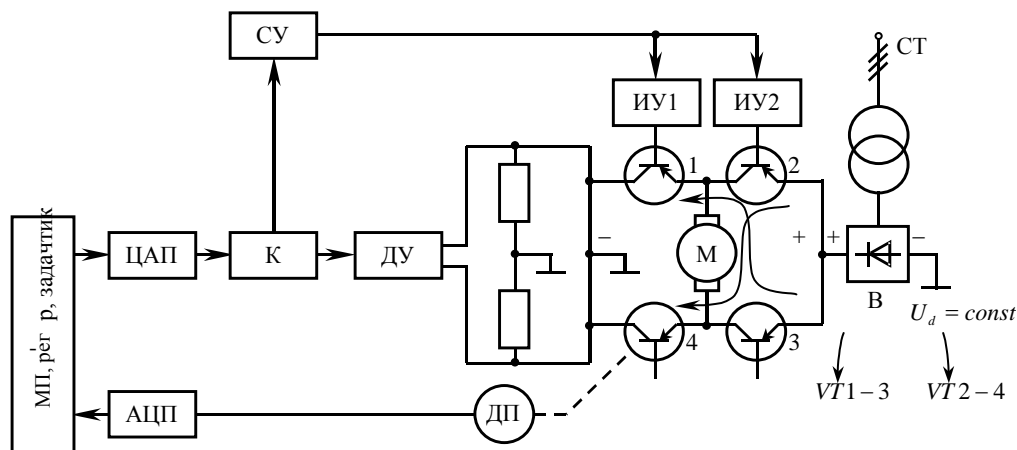
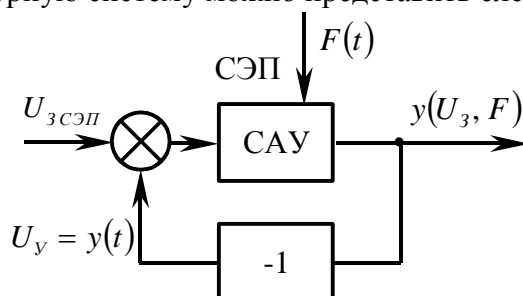


Рисунок 3.11 – СЭП на базе ШИП и микропроцессорном регуляторе

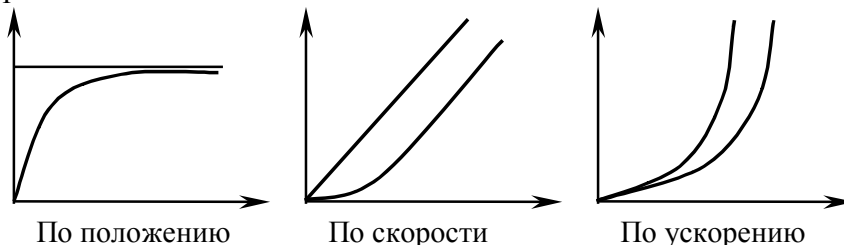
В общем виде структурную систему можно представить следующим образом:



$F(t)$  — возмущение,  $\sigma_{ст\ y} + \sigma_{ст\ в}$  — статическая погрешность по управляющему и по возмущающему воздействию.

#### Причины возникновения ошибок в САУ СЭП

- 1 Статическая погрешность - определяется  $\sigma_{ст\ y}$  и  $\sigma_{ст\ в}$ .
- 2 Форма задания



- 3 Статические свойства САУ:

- статическая САУ;
- астатическая САУ I порядка;
- астатическая САУ II порядка.

- 4 Установка датчика на станке:

- ДП на столе;
- ДП на ходовом винте;
- ДП на ДПТ.

РЭП входит составной частью в СЭП.

В СЭП существуют следующие погрешности:

- 1  $\Delta_M$  — моментная ошибка;  $\Delta_M = \sigma_{ст}$  (по положению).
- 2  $\Delta C = \sigma_{ск} = Z_v$  — ошибка по скорости.
- 3  $\Delta'_d, \Delta''_y = \sigma_{дин}$  — динамическая ошибка.

Рассмотрим эти погрешности подробнее:

1  $\Delta_M$  или  $\sigma_{II}$  ошибка по положению, которая равна величине статической погрешности при обработке задания по положению (рис. 3.12):

$$\Delta_M = \frac{X_z}{1+k_M}, \quad U_3 = 0, \quad M_C = \text{реакция привода},$$

где  $k_M$  — коэффициент передачи системы по моменту:

$$k_M = \frac{M_{cm}}{\varphi U_p} \Rightarrow k_M = f(k_v, \beta_{РЭП}, u_{РСЭП}),$$

где  $k_v$  — коэффициент передачи по скорости (РЭП);  $M_{cm}$  — статический момент;  $\varphi$  — величина углового перемещения;  $u_p$  — передаточное число редуктора;  $\beta_{РЭП}$  — жесткость характеристики для РЭП.

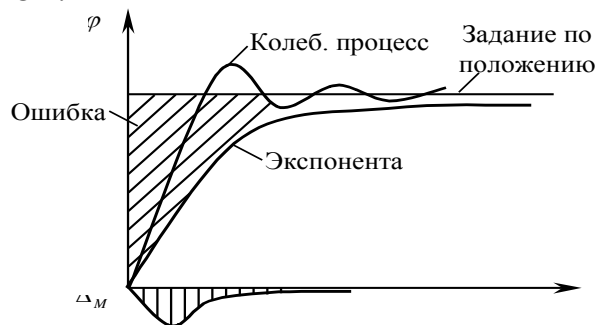


Рисунок 3.12 – Ошибка по положению

2  $\Delta_C = \sigma_{ск} = Z_v$  - ошибка по скорости (статическая) (рис. 3.13).

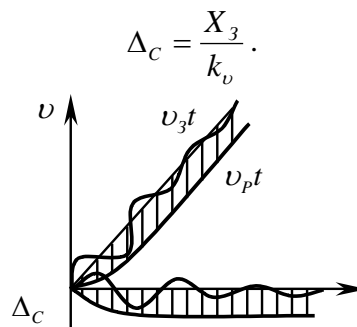


Рисунок 3.13 – Ошибка по скорости

При обработке задания по скорости погрешность зависит от величины задания  $X_3$  (прямо пропорционально) и обратно пропорционально коэффициенту передачи по скорости, причем

$$k_v = f(a, b, u_p),$$

где  $a$  — учитывает настройку ЧПУ;  $b$  — учитывает связь между скоростью двигателя и напряжением управления в ЧПУ;  $u_p$  — передаточное число редуктора.

3 Динамическая погрешность.

Динамические погрешности появляются в момент появления управляющих или возмущающих воздействий на систему  $g(t)$  и  $f(t)$ , а также зависят от свойств регулируемого электропривода: инерционные свойства  $T_M$ ,  $J$ ,  $k_{PC} = \prod_{i=1}^n k_i$ . Погрешности влияют на точность обработки задания, качество и производительность.



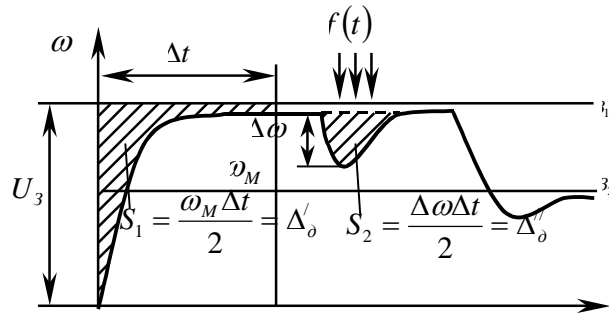


Рисунок 3.14 – Динамическая погрешность

### 3.4 Динамика СЭП

Оценка динамических свойств осуществляется по идеям, заложенным в РЭП. Распространен метод структурных схем и дифференциальных уравнений Коши.

Динамика предполагает построение кривых переходных процессов для выходных параметров (рис. 3.15).

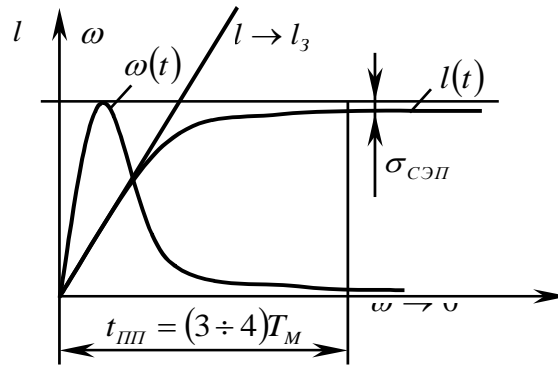


Рисунок 3.15 – Переходные процессы для выходных параметров

Для получения такого вида переходных процессов добавляется звено на выходе системы, которое представляет собой интегрирующий элемент:

$$W_p(p) = \frac{1}{T_M p} = \frac{k_p}{p}, \quad \text{где } k_p = \frac{1}{u_p}.$$

$$W_{\text{ДП}}(p) = k_{\text{ДП}} = \frac{U_{\text{Д}}}{l}, \quad W_{\text{РП}}(p) = k = \frac{k_{\text{РС необх}}}{k_{\text{ДП}} k_{\text{Д}} k_{\text{ТП}} k_{\text{РС}} k_{\text{РТ}}}.$$

Здесь неизвестен коэффициент  $k_{\text{РС необх}}$ .

$$k_{\text{РС необх}} = \frac{l_3 - \sigma_{\text{СЭП}}}{\sigma_{\text{СЭП}}}, \quad \text{где } \sigma_{\text{СЭП}} = \frac{X_3}{1 + k_{\text{РС необх}}}.$$

$$k_{\text{РП}} = \frac{k_{\text{РС необх}}}{\prod_{i=1}^n k_i}, \quad \text{где } \prod_{i=1}^n k_i = k_{\text{РС}} k_{\text{РТ}} k_{\text{ТП}} k_{\text{Д}} k_{\text{ДП}}.$$

$$U_{\text{ЗСЭП}} = \frac{U_{\text{ЗРЭП}}}{k_{\text{РП}}}.$$

По полученным кривым переходных процессов определяются точностные и скоростные параметры  $\sigma_{\text{СЭП}}$ ,  $t_{\text{III}}$ .

## 4 ЦИФРОВОЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД

### 4.1 Необходимость в цифровом приводе

ЦЭП является современным средством управления. Его применение обусловлено:

- 1) возрастающей сложностью техпроцесса;
- 2) возрастающей сложностью управления;
- 3) необходимостью выполнения функций, которые ранее не выполнялись.

Достоинства ЦЭП:

- 1 Устраняют тепловые и временные нестабильности аналоговых СУ.
- 2 Устраняют искажения сигналов, вносимые преобразователями и усилителями.
- 3 Повышают точность управления и быстродействие из-за высокой степени дискретизации.
- 4 Обеспечивают более глубокое регулирование и диапазон регулирования расширяется до десятков тысяч.
- 5 Обеспечивают сопряжение с программозадающими устройствами.
- 6 Упрощают процессы настройки и контроля.
- 7 Обеспечивают цифровую индикацию заданных и действительных значений.

### 4.2 Общая структура ЦЭП

Общая структура ЦЭП представлена на рис. 4.1 и содержит следующие основные блоки:

- МП — микропроцессор (микроконтроллер);  
 $\Sigma$  — сумматор;  
Р — регулятор;  
ОЗУ — оперативное запоминающее устройство;  
П ввода — порт ввода (УСО);  
П вывода — порт вывода (УСО).

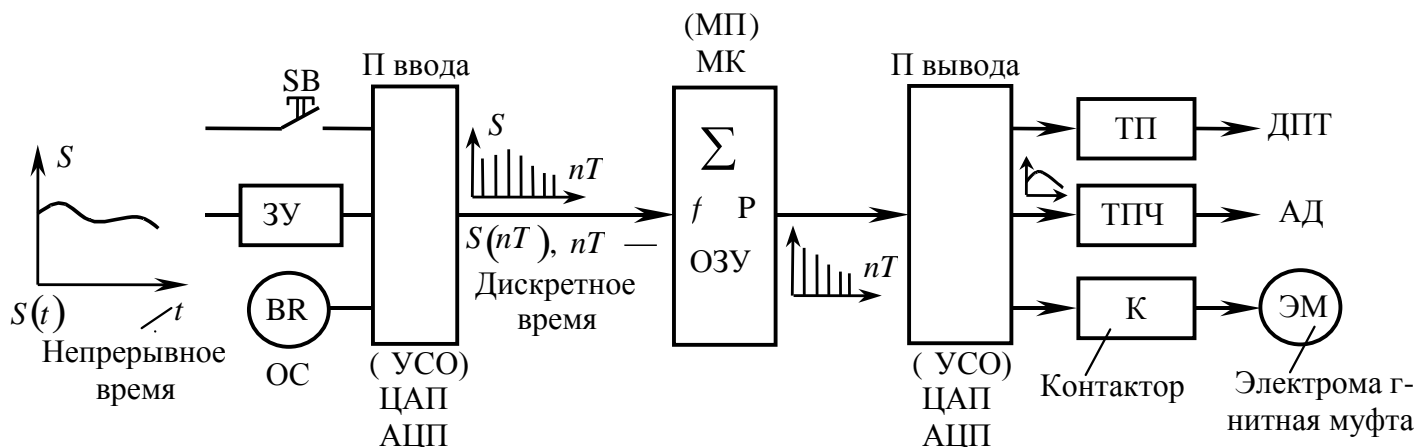


Рисунок 4.1 – Общая структура ЦЭП

Одним из важных элементов ЦЭП является программируемый контроллер.

До сих пор были известны многоконтактные, многоцепные аппараты, выполняющие определенную жесткую программу по управлению различными объектами.

Они подразделялись на две группы:

- Программируемые контроллеры осуществляют логические связи между состоянием выходных и входных элементов. Их особенностью является отсутствие жестких схем, а значит, и жестких программ, они легко перестраиваются для выполнения любой новой программы.

В настоящее время применяются следующие виды ПК:

- #### 4.2.2 Области применения программируемых контроллеров

- автоматические станочные линии;
- поточные транспортные системы;
- управление установками литья под давлением;
- управление сварочным оборудованием;
- сложные логические зависимости (СлавГРЭС для запуска имеет 800 логических условий);
- контроль нескольких сотен параметров с их индикацией.

Структурная схема ЦЭП содержит передаточные функции, звенья САУ (рис. 4.2).

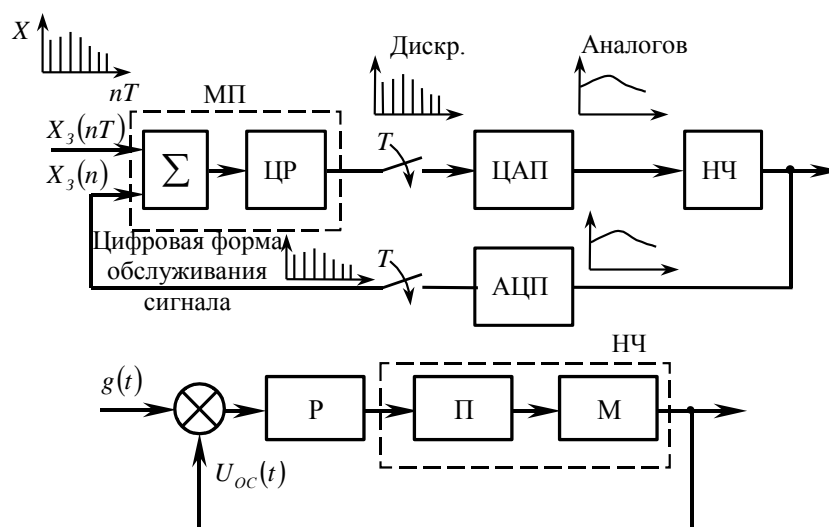


Рисунок 4.2 – Структурные схемы ЦЭП

НЧ — неизменяемая часть: регулятор, преобразователь, двигатель. Но, как правило, берем П — преобразователь, М — двигатель, ИМ — исполнительный механизм, а регулятор — цифровой (ЦР).

#### 4.3.1 Понятие квантования и восстановления

Квантование (выборка) или дискретизация — это неизбежный процесс в ЦЭП, обусловленный дискретной природой ЭВМ (основной элемент в ЦЭП).

В итоге подразумевается замена непрерывного сигнала последовательностью чисел, представляющих значения этого сигнала в определенные моменты времени.

Возможные определения в литературе:

- $T$  — период дискретизации;
- $\Delta t$  — время дискретизации;
- $h$  — шаг дискретизации.

#### 4.3.2 Особенности квантования

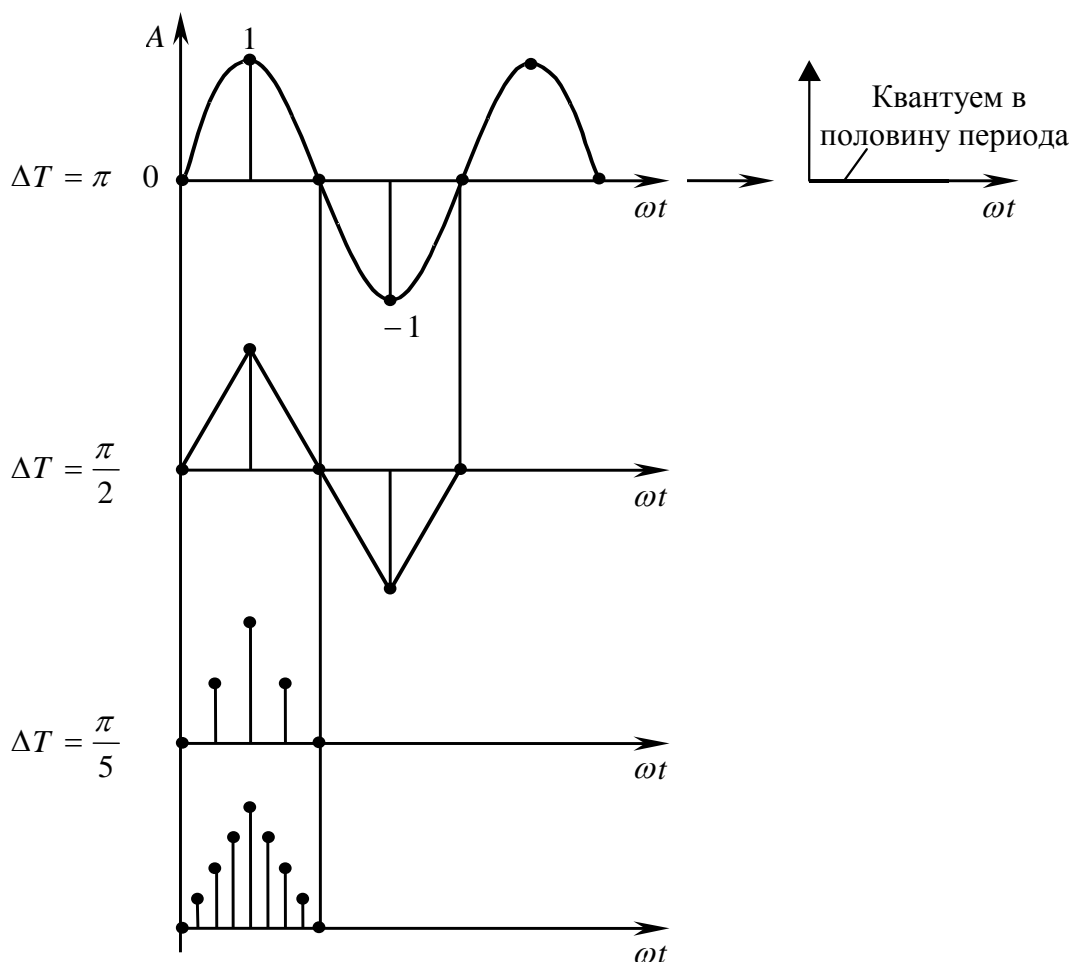
Величина  $T$ , или  $\Delta t$ , или  $h$  существенно влияет на точность восстановления сигнала, представленного в дискретной форме.

Восстановление — это процесс, противоположный процессу преобразования непрерывного сигнала в последовательность чисел.

$$X(t) \rightarrow X(nT).$$

$$X(nT) \rightarrow X(t) \text{ — восстановление.}$$

Пример.



При уменьшении  $T$  точность восстановления возрастает.

Время дискретизации должно быть меньше наименьшей постоянной времени. Некоторые участки сигнала нельзя восстановить.

Зависимость погрешности восстановления от числа квантований за период выглядит следующим образом:

$nT$	5	10	100	300
$\sigma$	0,6	0,3	0,03	0,01

Для синусоиды 300 квантований за период оптимальны.

Таким образом, величина погрешности восстановления определяется количеством дискретов определенного временного промежутка.

- 1 Представление сигналов в аналоговой и дискретной форме.
- 2 Уравнения в аналоговой и дискретной форме.
- 3 Виды передаточных функций в аналоговой и дискретной форме.

Рассмотрим основные положения теории дискретных сигналов.

Существуют следующие методы определения времени, периода, или шага дискретизации:

- 1 По теореме Котельникова

$$T = \frac{1}{2f_{\max}}.$$

- 2 Для тиристорного преобразователя:

$$T = \frac{2\pi}{2\pi f m} = \frac{1}{m f_c},$$

где  $m$  — число фаз — эта формула для САУ с ТП.

- 3 Для ШИП (для следящих приводов при контурной обработке):

$$T = \frac{1}{\omega_{\max}} \frac{\delta_{\text{дон}}}{R},$$

где  $\omega_{\max}$  — скорость обхода контура;

$\delta_{\text{дон}}$  — допустимая погрешность (в пределах 10 микрон);

$R$  — радиус тела вращения.

Скорость обхода  $\omega = \frac{v}{R}$ , где  $v$  — линейная скорость, мм/мин, около 600 мм/мин. Радиус вращения  $R = 0,1$  м.

- 4 По требуемой точности:

$$T \leq \frac{1}{\omega_{\max}} \frac{m+1}{\sqrt{\frac{\delta_{\text{дон}}(m+1)}{R}}},$$

где  $\delta_{\text{дон}}$  — требуемая точность;

$m$  — порядок экстраполяции.

При  $m = 0 \Rightarrow T = \frac{1}{\omega_{\max}} \frac{\delta_{\text{дон}}}{R}.$

- 5 По порядку астатизма:

$$T \geq \frac{1}{a^{v+1}} \sqrt{\frac{\delta_{\text{дон}}(v+1)!}{a^{v+1}}},$$

где  $v$  — порядок астатизма.

- 6 По критерию Джури (по комплексной ПФ).

- 7 По требуемой точности управления

$$T = \frac{\delta_{mp}}{v}.$$

## Основные соотношения для дискретных сигналов

### 1 Сравнительная оценка представления сигналов в САУ

$$p = \pm \alpha \pm j\omega; \quad z = e^{-pt}.$$

Аналоговая		Дискретная	
$t$	$p$	$nT$	$z$
$x(t)$	$x(p)$	$X[nT], X[n]$	$x(z)$
$1(t)$	$\frac{1}{p}$	$1[nT]$	$\frac{z}{z-1}$

Примеры представления сигналов приводятся в таблицах преобразования или в таблицах соответствия, которые представлены в математических справочниках.

### 5 Представление дискретных сигналов в виде решетчатых функций

Решетчатая функция принимает значения в дискретные промежутки времени, а между ними — равна нулю (рис. 4.3).

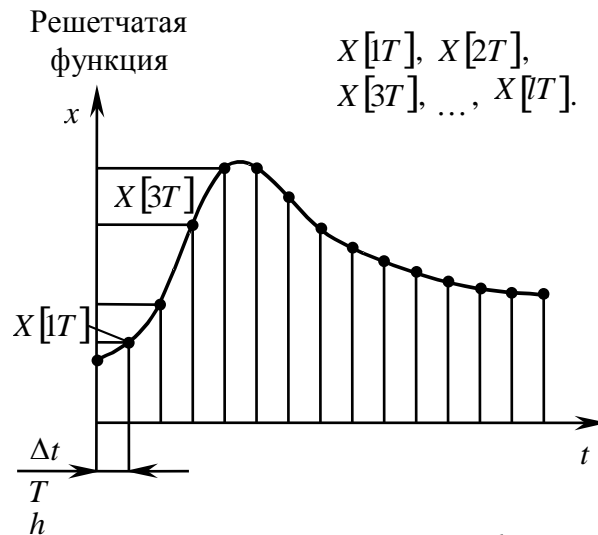


Рисунок 4.3 - Решетчатая функция

### 6 Представление скорости

$$v_{\text{аналог}} = \frac{dx}{dt} = px,$$

где  $\frac{d}{dt}$  — оператор дифференцирования.

Скорость дискретного сигнала

$$\Delta x = X_1[2T] - X_2[1T] \text{ — разность смежных ординат.}$$

### 7 Уравнение, описывающее уравнение сигналов

Для аналоговых сигналов — дифференциальное уравнение.

Для дискретных сигналов используются разностные уравнения:

$$C_m \Delta^m X[nT] + l_{m-1} \Delta^{m-1} X[nT] = b_n \Delta^k Y[nT] + b_{n-1} \Delta^{k-1} \dots$$

### 8 Методы решения уравнений

Для аналоговых сигналов дифференциальные уравнения в операторной форме решаются с применением преобразований по Лапласу:

$$x(p) = L[x(t)] = \int_0^T x(t) e^{-pt} dt.$$

Аналоговые системы можно интегрировать, а дискретные — суммировать. Дискретное преобразование в различных источниках выглядит по-разному.

$$\begin{aligned} g(p) &= x(z) = D[x^*(t)], \\ g(p) &= x(z) = x^*(t), \\ g(p) &= x(z) = D[x^*(t)] = D[\sum [X[nT]]\delta[t-nT]], \end{aligned}$$

где  $\delta[t-nT]$  — дельта-функция.

9 Передаточные функции при z-преобразованиях

$$W(p) = \frac{y(p)}{x(p)}.$$

Для последовательного соединения

$$W(p) = \prod_{i=1}^n W_i(p).$$

Для замкнутой системы

$$\begin{aligned} W_3(p) &= \frac{W_{PC}(p)}{1 \pm W_{PC}(p)W_{OC}(p)}, \\ W_3(p) &= \frac{N(p)}{M(p)}. \end{aligned}$$

Передаточная функция для ошибки

$$\varepsilon(p) = \frac{1}{W_{PC}(p)}.$$

Для дискретной системы

$$\begin{aligned} W(z) &= \frac{y(z)}{x(z)}, \\ W(z) &= \prod_{i=1}^n W_i(z), \\ \varepsilon(z) &= \frac{1}{W_{PC}(z)} \text{ и т. д.} \end{aligned}$$

#### 4.4 Синтез ЦЭП

Цель синтеза - проектирование такой структуры ЦЭП (рис. 4.4), которая обеспечивает:

- 1  $t_{III} \rightarrow \min$ .
- 2  $\sigma_{cm} = (5...10)\%$ .
- 3 Абсолютную устойчивость.

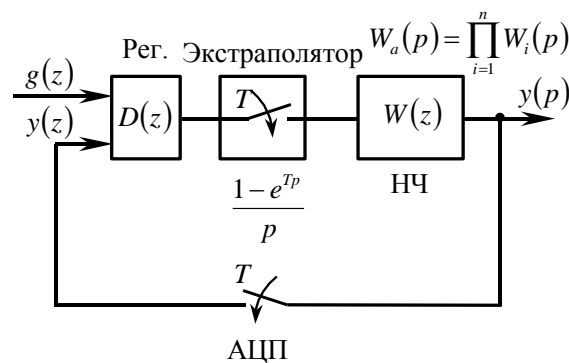


Рисунок 4.4 – Структурная схема ЦЭП

В рассматриваемой системе необходимо решать следующие вопросы:

- 1 Определить, чему будет равна ПФ регулятора  $W(z)$ .
- 5 Найти передаточную функцию непрерывной части  $W_{HЧ}(z)$ .
- 6 Найти характер изменения выходного параметра  $y(z)$  (в аналоговой системе  $\omega = f(t)$ ).

Пути решения данных задач представлены ниже.

### 1 Построение переходного процесса в цифровой форме

Составляем ПФ замкнутой системы в  $z$ -преобразованиях.

$$W_{ЗС}(p) = \frac{W_{pez}(z)W_{ЦАП}(z)W_{HЧ}(z)}{1 + W_{pez}(z)W_{ЦАП}(z)W_{HЧ}(z)W_{ОС}(z)} = \frac{\Delta y(z)}{\Delta x(z)};$$

$$g(z) = U_3(z).$$

Пусть задание будет в виде единичного скачка

$$1[t] \rightarrow \frac{1}{p} \rightarrow \frac{z}{z-1}.$$

Задача синтеза сводится к анализу реакции системы на единичный скачок.

$$W_{ЗС}(z) = \frac{\Delta y(z)}{\Delta g(z)} \Rightarrow \Delta y(z) = W_{ЗС}(z) \frac{z}{z-1},$$

$$\Delta y(z) = \frac{M(z)}{N(z)} \frac{z}{z-1},$$

$$\Delta y(z) = \frac{a_1 z^n + a_2 z^{n-1} + \dots}{b_1 z^k + b_2 z^{k-1} + \dots},$$

$y(z)$  — на выходе системы.

Для построения кривой переходного процесса в виде решетчатой функции (рис. 4.5) осуществляется последовательное деление числителя на знаменатель или разложение в ряд Лорана, осуществляемое на ЭВМ при помощи специальной программы. Также определяется  $nT \sim t_p$  и  $\sigma_{см}$ .

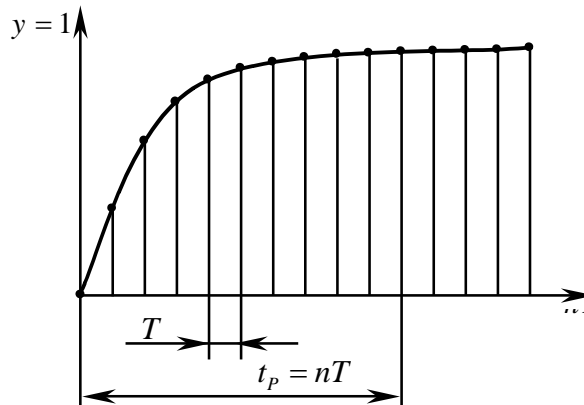


Рисунок 4.5 – Построение решетчатой функции

Для составления передаточной функции для ЦЭП в дискретной форме, необходимо составить дискретную передаточную функцию (ДПФ) непрерывной части и ДПФ оптимального регулятора.

### 2 ПФ НЧ в дискретной форме

$$W_{HЧ}(z).$$

Для решения используем следующие методы :



1 По реальным звеньям, входящим в систему.

$$W_{Hq}(p) = \prod_{i=1}^n W_i(p) = \frac{a_1 p + a_2}{b_1 p^2 + b_2 p},$$

где  $\prod_{i=1}^n W_i(p)$  — представляет собой передаточную функцию ТП, Д1, Д2, ИМ.

Для перевода ПФ в аналоговой форме в ДПФ необходимо:

- исходное выражение разложить на простые дроби;
- используя таблицы соответствий, получить выражения с  $z$ -преобразованием:

$$\frac{a_1 p + a_2}{b_1 p^2 + b_2 p} \rightarrow \frac{a_1 z^n + a_2}{b_1 z^k + b_2 z^{k-1}}.$$

2 Составления ПФ замкнутой системы в дискретной форме с использованием инженерного метода.

3 С использованием желаемой ПФ разомкнутой системы.

Используя идею последовательной коррекции составляют ПФ замкнутой системы:

$$W_{\text{зс}}(p) = \frac{W_{\text{ж}}(p)}{1 + W_{\text{ж}}(p)W_p(p)},$$

где  $W_{\text{ж}}(p) = W_{\text{и}}(p)W_{\text{а}}(p) = \frac{1}{T_{\text{и}} p} \frac{1}{T_{\text{а}} p + 1}$ , где  $W_{\text{и}}(p)$  — ПФ интегрирующей части,  $W_{\text{а}}(p)$  —

ПФ аperiodического звена.

Если  $a = \frac{T_{\text{и}}}{T_{\text{а}}} = 1, 2, 4$ , тогда получим при:

- $\alpha = 1$  — колебательный переходный процесс;
- $\alpha = 2$  — аperiodический переходный процесс;
- $\alpha = 4$  — экспоненциальный переходный процесс.

Полученную ПФ замкнутой желаемой системы преобразуем в дискретную по известным правилам.

### 3 Составление передаточной функции оптимального регулятора в ЦЭП в дискретной форме

Существует несколько методов составления передаточной функции:

1 Исходя из идеи технического оптимума:

$$W_p(p)W(p) = W_{\text{ж}}(p) \text{ — технический оптимум,}$$

где  $W_p(p)$  — изменяемая часть,

$$W_p(p) \frac{W_{\text{ж}}(p)}{W_{\text{и}}(p)};$$

$W(p)$  — неизменяемая часть.

2 По частотным характеристикам ПФ с использованием ЛАЧХ. Цепь постоянного тока:

- вся положительная фаза — нечетное число;
- вся отрицательная фаза — четное число;

#### 4.4.1 Примеры реализации цифровых контуров

Пример реализации цифровых контуров положения.

Рассмотрим трехконтурный СЭП (рис. 4.6), а контур положения в двух вариантах:

- в аналоговой форме;
- в цифровой форме.

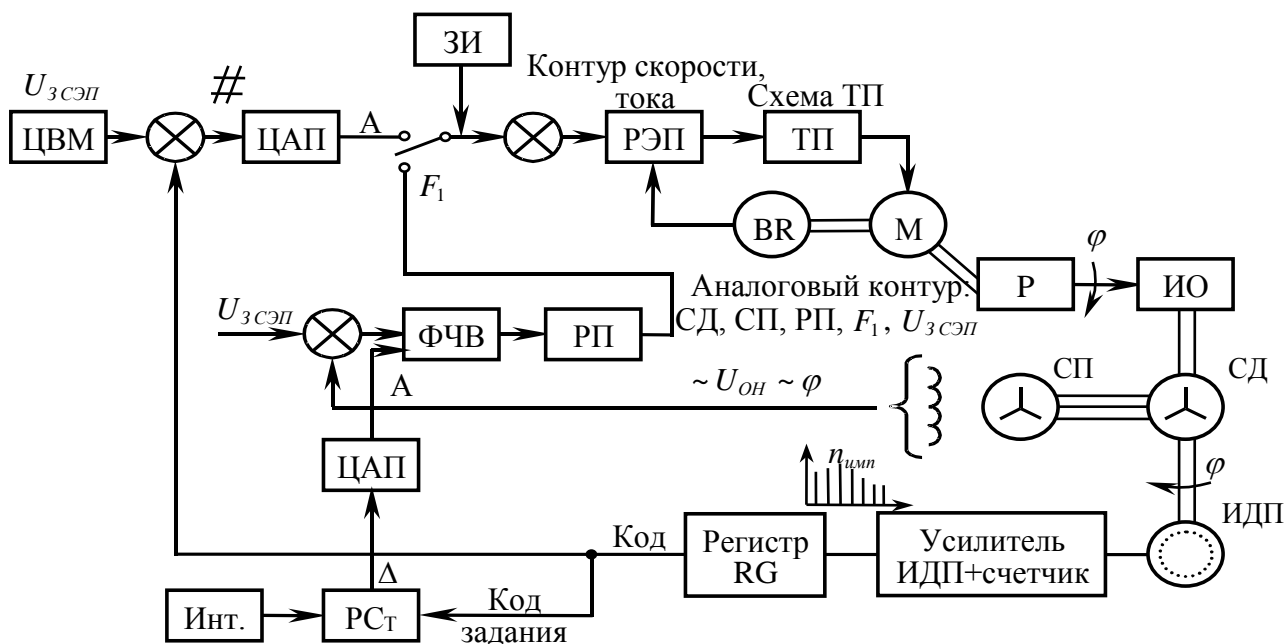


Рисунок 4.6 – Реализация СЭП с цифровым контуром положения

#### 4.5 Измерительные преобразователи в СЭП

ИП — измерительный преобразователь (датчик) может быть установлен в различных участках кинематической цепи, что определяет точность контроля выходного параметра.

Основные параметры ИП:

- 1 Статическая характеристика ИП.

Коэффициент усиления  $k_{yc} = k$ , где  $k = \frac{\Delta y}{\Delta x}$ ; коэффициент передачи  $k_{yc} = k_{пер}$ .

Если единицы измерения входного параметра  $x$  и выходного параметра  $y$  одинаковы — коэффициент масштабирования, а  $k = k_{преоб}$  — коэффициент преобразования, если  $x$  и  $y$  — разные величины (угловая скорость и напряжение).

- 2 Чувствительность — это та минимальная величина, которую учитывает датчик и определяется отношением.

$$k_{чувствит} = \frac{\Delta y}{\Delta x_{\min}} \text{ — коэффициент чувствительности.}$$

Разрешающая способность — минимальная величина перемещения, выражающаяся в числе импульсов.  $k_{р сн}$ .

- 3 Быстрота реакции или переходный процесс, характеризующийся временем  $t_{пп}$  (рис. 4.7).

При этом инерционность учитывается через величину постоянной времени датчика.

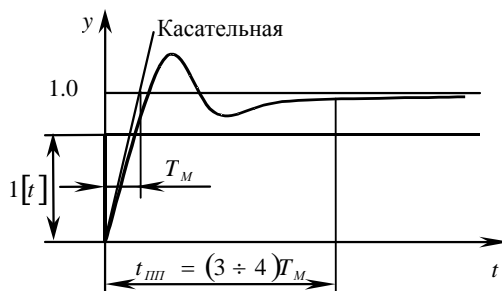


Рисунок 4.7 – Вид переходного процесса в ИП

## 4.6 Разновидности датчиков

### 1 Первая группа -

различаются по наличию источника энергии в преобразователе:

- генераторные датчики — тахогенератор, термопара, тензодатчик;
- параметрические — фотоэлектрический преобразователь.

### 2 Вторая группа -

различаются по принципу действия.

- 1 Резистивные (потенциометрические);

$$R: X \rightarrow Z \rightarrow I \rightarrow L,$$

где  $X$  — параметр;

$Z$  — полное сопротивление;

$I$  — ток;

$L$  — перемещение.

- 2 Электромагнитные;

$$X \rightarrow r_M \rightarrow L_{ин} \rightarrow X_L \rightarrow I \rightarrow U \rightarrow L,$$

где  $r_M$  — магнитное сопротивление;

$L_{ин}$  — индуктивность;

$X_L$  — индуктивное сопротивление;

$L$  — перемещение.

- 3 Фотоэлектрические;

$$X \rightarrow W_{opt} \rightarrow I \rightarrow U \rightarrow L,$$

где  $W_{opt}$  — мощность оптического сигнала;

$L$  — перемещение.

### 3 Третья группа -

различаются характером выходных сигналов:

- с непрерывным сигналом;
- импульсные —  $n$  импульсов на выходе;
- кодовые — код или шифр.

### 4 Четвертая группа -

различаются по привязке нуля шкалы:

- ноль привязан (инкрементные датчики);
- ноль может перемещаться (обычные датчики).

#### 4.6.1 Особенности импульсных датчиков

Формирование импульсов осуществляется механическим, электрическим или электронным путем. При этом используются различные способы развертки: электромеханическая, электронная (рис. 4.8).

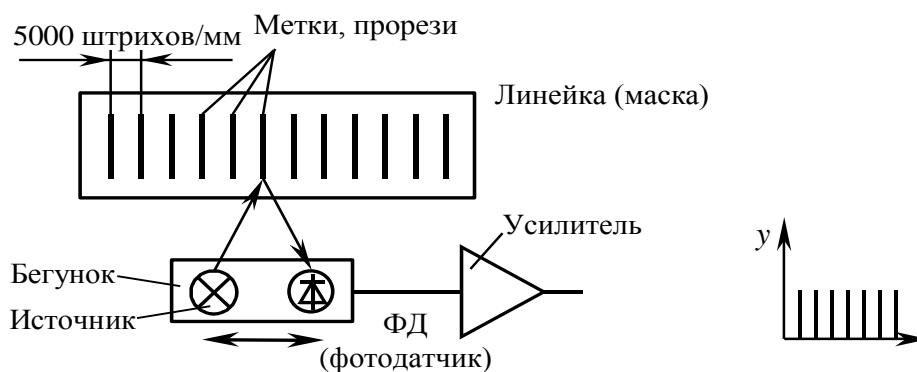


Рисунок 4.8 – Пример формирования импульсов в датчике

На 1 мм приходится до 5000 штрихов или линий.

На рис. 103 развертка будет электромеханическая. Недостатки: инерционность, низкая точность. Такие датчики (с линейкой) могут определять направления движения исполнительного органа ИО (рис. 4.9).

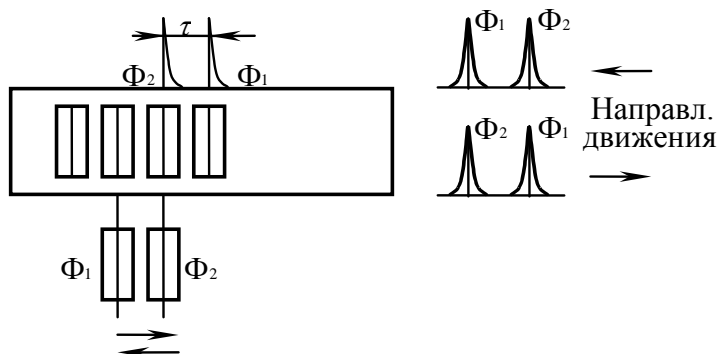
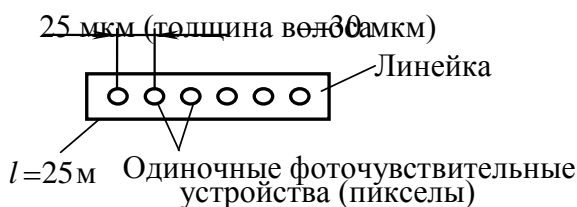


Рисунок 4.9 – Определение направления движения ИО

Пример электронной развертки.

В этом случае используются фотоэлектрические линейки или матрицы (рис. 4.10).



$$N_{\Pi} = 1024 \text{ или } 2048 \text{ пикселей}$$

Рисунок 4.10 – Фотоэлектрическая линейка

Получаем видеосигнал, как показано на рис.4.11.

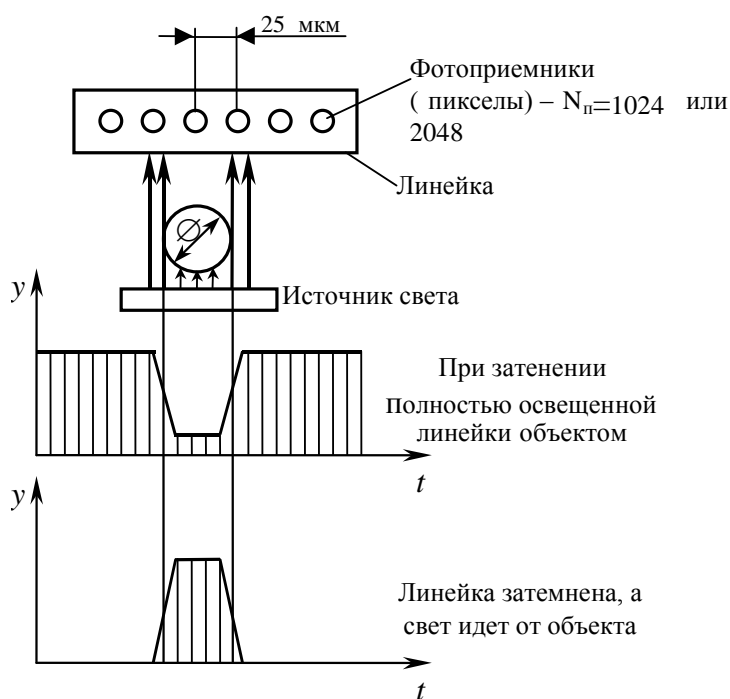


Рисунок 4.11 – Пример получения видеосигнала

## 4.6.2 Кодовые датчики

Рассмотрим пример кодового датчика на примере фотоэлектрического датчика. Фотоэлектрический кодовый датчик представляет собой набор непрозрачных дисков, сидящих на одном валу, связанном с исполнительным механизмом. Каждый диск имеет  $n$ -е число концентрических окружностей с прорезями с соответствующей дискретностью (рис 4.12).

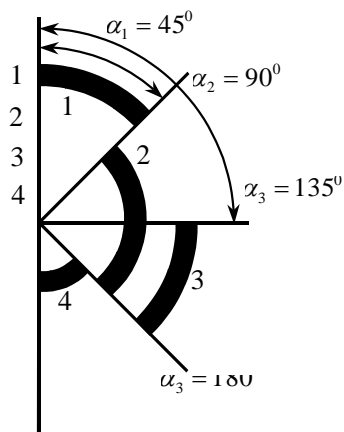


Рисунок 4.12 – Кодировка угла поворота в кодовом датчике

Рисунок. 4.12 дает представление четырехразрядного двоичного слова, как показано в табл.4.1.

Таблица 4.1 - Представление четырехразрядного двоичного слова

IV	III	II	I
$2^3$	$2^2$	$2^1$	$2^0$
8	4	2	1
0	0	0	1
0	0	1	0
0	0	1	1
0	1	0	0

Разряды двоичной системы  
Двоичная система счисления

$$\alpha_1 = 45^\circ \sim 0001$$

$$\alpha_2 = 90^\circ \sim 0010$$

$$\alpha_3 = 135^\circ$$

$$\alpha_3 = 180^\circ$$

Кроме дисков с прорезями, в таких фотоэлектрических кодовых датчиках используются линейные источники оптического излучения, одиночные фотоприемники.

Для повышения разрядности используется  $n$ -е число дисков с  $n$ -м числом прорезей.

В импульсных датчиках определяется величина шага  $\tau = \frac{1}{n}$ , где  $n$  — число штрихов на 1 мм.

Дискретная разрешающая способность

$$\Delta A = \frac{\tau}{n_{имп}},$$

где  $n_{имп}$  — число импульсов.

## 5 КОНСТРУИРОВАНИЕ ПРИНЦИПИАЛЬНЫХ СХЕМ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДАМИ

Формируем два вида САУ:

- аналоговую;
- цифро-аналоговую (цифровые контуры скорости или положения).

Рассмотрим пример реализации РЭП и СЭП с цифровыми контурами скорости и положения соответственно (рис.5.1 и 5.2).

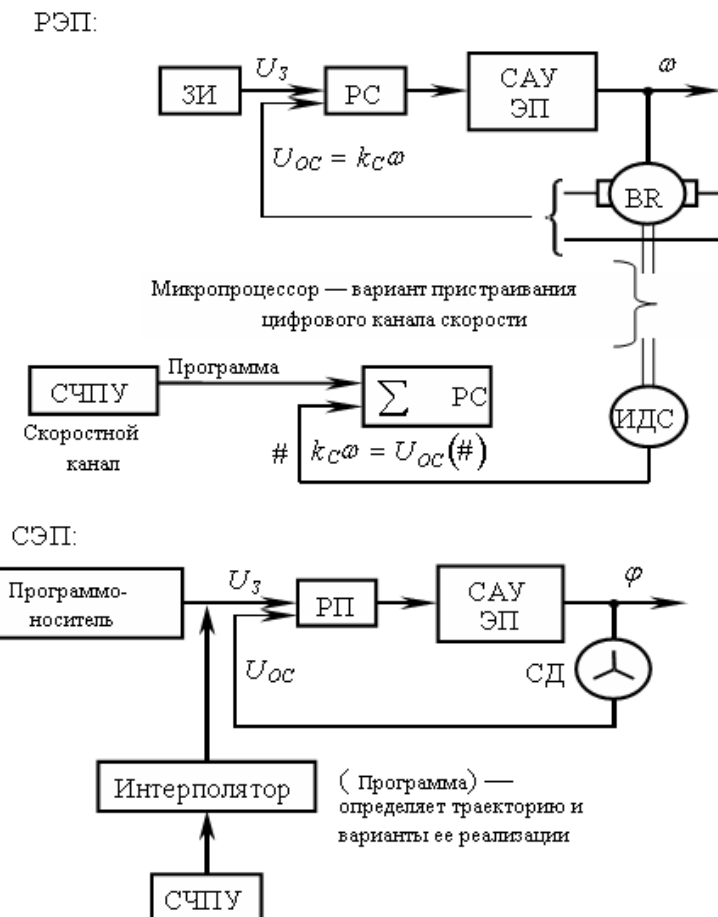


Рисунок 5.1 – Пример построения САУ ЭП с аналоговыми датчиками

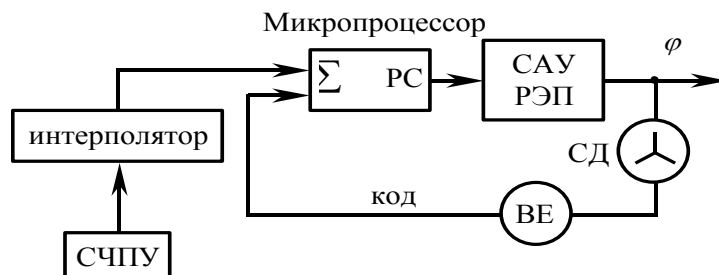


Рисунок 5.2 – Система с кодовым (импульсным) датчиком в обратной связи

## 5.1 Особенности электродвигателей для следящих приводов и роботов-манипуляторов

Основная тенденция — переходить на двигатели переменного тока, ориентация на частотные преобразователи.

Преимущественно для следящих приводов и роботов-манипуляторов применяются ДПТ по следующим причинам:

- 1 Требуется более широкий диапазон регулирования.
- 2 Необходимы повышенные ускорения.
- 3 Редко в СЭП осуществляется установившийся режим, система все время находится в динамическом режиме.
- 4 Существует много разновидностей ошибок и видов задания.

Требования к двигателям постоянного тока для СЭП и роботов:

- 1 Необходимость формирования повышенных (улучшенные) характеристик в динамике и статике.
- 2 Повышенная перегрузочная способность.
- 3 Необходимость уменьшения механической постоянной.
- 4 Необходимость улучшения коммутации (не допускать загрязнения коллектора).

Существующие разновидности ДПТ в современных приводах:

- 1 ДПТ с гладким ротором: якорь выполнен в виде сплошного вала, нешихтованного, малого диаметра (чуть ли не в 10 раз меньше длины), обмотка «навалом».
- 2 Электродвигатель с дисковым немагнитным якорем: якорь представлен изолированным диском, минимальная механическая постоянная времени. Достоинства: малая электромагнитная и механическая постоянная, высокие динамические токи без ухудшения коммутации, допустимое ускорение до  $50000 \text{ рад/с}^2$ . Недостатки: повышенная колебательность за счет малой механической постоянной, возможность механических ударов при больших ускорениях, малая постоянная времени нагрева (быстрый нагрев).
- 3 Тихоходные двигатели с возбуждением от постоянных магнитов. Достоинства: не требуется редуктор, высокая перегрузочная способность: от 6 до 10, момент инерции двигателя превышает момент инерции механизма; диапазон регулирования — несколько тысяч (иногда до десятков тысяч). Недостатки: те же, что и у обычных ДПТ.
- 4 Бесконтактные, бесколлекторные двигатели постоянного тока. Представляют собой синхронные машины с возбуждением от постоянных магнитов. Достоинства: высокий срок службы и высокие эксплуатационные характеристики.

## 5.2 Шаговые двигатели (ШД)

Одним из прогрессивных примеров двигателей переменного тока является шаговый двигатель. Мощность низкая. Как приводные двигатели практически не используются.

Конструктивно шаговый двигатель содержит (рис. 5.3): статор с определенным количеством зубцов (выступов), количество пар которых определяет количество пар полюсов. Зубцы обозначаются  $z_p$ , число пар полюсов —  $2p$ . Статор питается напряжением переменного тока 27 В с частотой 720 Гц. Ротор имеет также зубцы или выступы. Характерной особенностью является то, что ротор вращается в направлении, обратном направлению вращения поля.

Вращение идет дискретно, величина шага —  $3^\circ$ . Величина вращательного момента довольно малая — сотые доли ньютон-метра. Поэтому ШД используются как серводвигатели, выполняющие служебные функции (для перемещения золотников в гидроприводах). Существуют ШД иностранного изготовления со значительным моментом, позволяющим использовать его как приводной двигатель в станочных приводах.

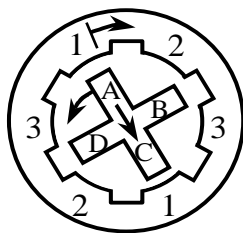


Рисунок 5.3 – Конструктивные особенности шаговых двигателей

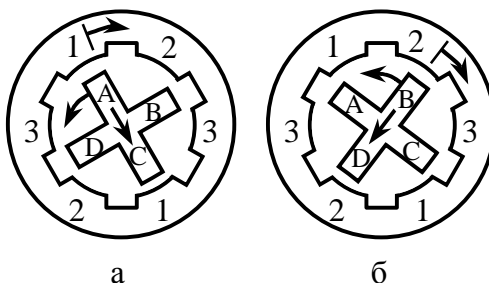
ШД подразделяются на следующие разновидности:

- 1 ШД с активным ротором при возбуждении от постоянных магнитов.
- 2 ШД с различным числом фаз.
- 3 ШД с различными способами возбуждения статора (постоянные магниты или нет).

Для обслуживания двигателей используются специальные системы управления, содержащие следующие элементы:

- ГИ — генератор импульсов;
- ФИ — формирователь импульсов;
- ЭК — электронный коммутатор, который определяет частоту следования импульсов и количество импульсов в «пачке» для питания той или иной пары полюсов;
- РИ — распределитель импульсов, который определяет подключение питания к соответствующим полюсам. Обеспечивает реверс (изменяет следование пачки);
- УМ — усилитель мощности, выполняет усиление сигналов, аналогичен по своим функциям инвертору в ТПЧ;
- РН — регулятор напряжения;
- РУ — ручка управления;
- ЗУ — задающее устройство.

Работа ШД иллюстрируется следующими кадрами (буква — зубцы ротора, номера — зубцы статора) (рис. 5.4).



а — начальное состояние; б — через шаг

Рисунок 5.4 – Иллюстрация работы ШД

Все схемы управления ШД выполняются, как правило, без обратных связей (рис. 5.5). Это объясняется отсутствием разрыва электромагнитной связи до предельной частоты 720 Гц. Разрыв может быть при повышенных нагрузках. Временные диаграммы, поясняющие работу ШД представлены на рис. 5.6.

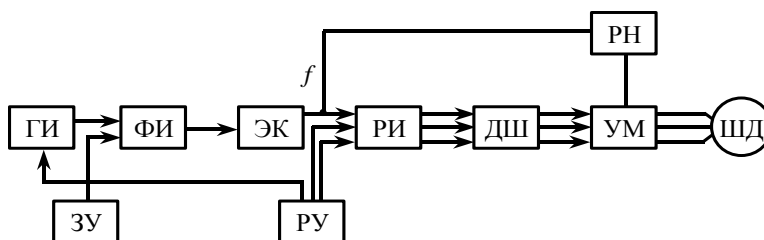


Рисунок 5.5– Система управления ШД



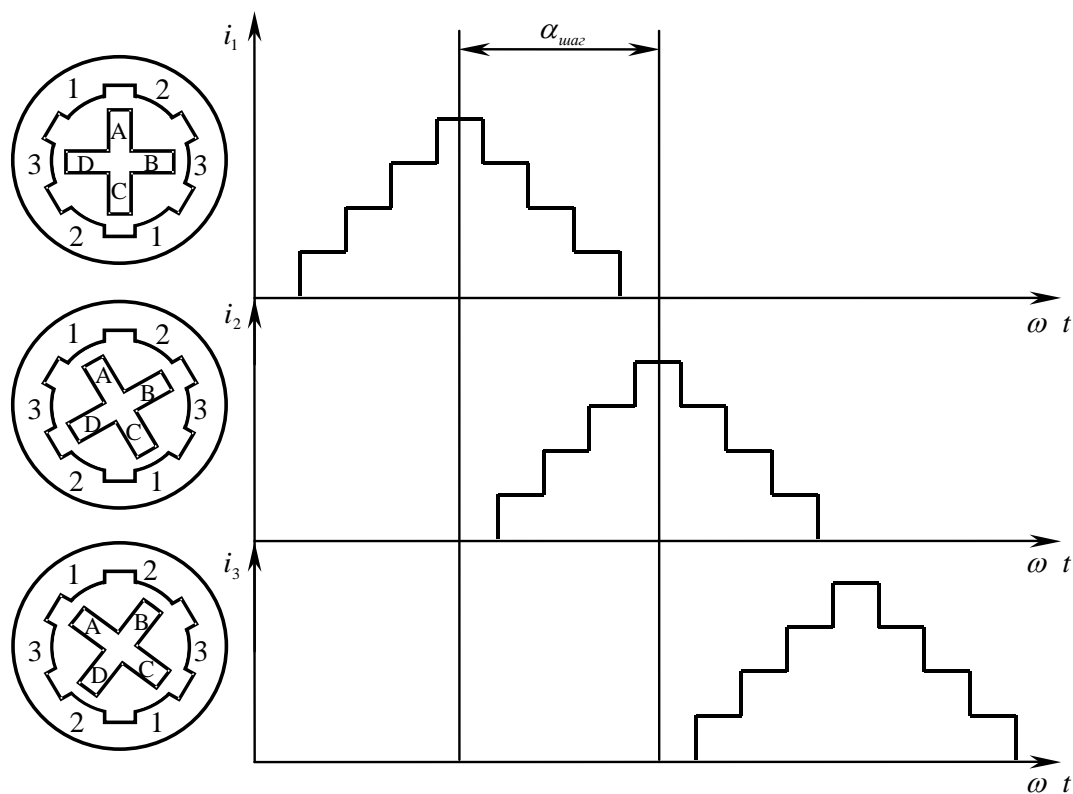


Рисунок 5.6 – Временные диаграммы, поясняющие работу ШД

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Башарин А. В. Управление электроприводами / Башарин А. В., Новиков В. А. — Л.: Энергоиздат, 1982. — 392 с.
- 2 Зимин Е.Н. Автоматическое управление электроприводами: Учеб. пособие для студентов вузов / Зимин Е.Н., Яковлев В.И. — М.:Высшая школа, 1979.— 318с.
- 3 Катков Р.Н. и др. Проектирование и расчет систем автоматизированного вентильного электропривода. — Горький, 1970. — 168 с.
- 4 Комплектные системы управления электроприводами тяжелых металлорежущих станков / Под ред. д. т. н. А. Д. Поздеева. - М.: Энергия, 1985. — 288 с.
- 5 Лебедев В. И. и др. Следящий электропривод. — М: Энергоатомиздат, 1986. — 223с.
- 6 Ильинский Н. И. Общий курс электропривода / Ильинский Н. И., Козаченко В. Ф. - М.: Энергоатомиздат, 1992. — 398 с.
- 7 Чиликин М.Г. Общий курс электропривода: Учебник для вузов / Чиликин М.Г., Сандлер А.С. — 6-е изд., доп. и перераб. — М.: Энергоиздат, 1981.—576с.
- 8 Шапарев Н. К. Автоматизация типовых технологических процессов металлообработки. — Киев; Одесса: Высшая школа, 1984. - 256 с.
- 9 Эпштейн И.И. Автоматизированный электропривод переменного тока. — М.: Энергоиздат, 1982. — 192 с.

Навчальне видання  
Шищенко Леонід Опанасович  
Приходько Ольга.Юрьевна

## АВТОМАТИЗОВАНИЙ ЕЛЕКТРОПРИВОД

Конспект лекцій

Роботу рекомендував до видання Шелковий О.М.

У авторській редакції

План 2006 р., п. 90 /

Підписано до друку 01.02.06.

Папір друк № 2. Гарнітура Таймс.

Ум. друк. арк. 3,0.

Наклад 100 прим. Зам.

Формат 60 x 84 <sup>1/16</sup>

Друк – ризографія.

Обл. - вид. арк. 3,2.

Ціна договірна.

---

Видавничий центр НТУ “ХПІ”, 61002, м. Харків, вул. Фрунзе, 21

Свідоцтво про державну реєстрацію ДК №116 від 10.07.2000.

---